

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



جامعة قاصدي مرباح - ورقلة

Université Kasdi Merbah Ouargla

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département des sciences agronomiques



THÈSE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT en SCIENCE

Spécialité : Sciences Agronomiques

Option Sciences du Sol

Par MIHOUB Adil

Thème

**ÉTUDE DE LA DYNAMIQUE DU PHOSPHORE DANS
LES SOLS CALCAIRES SAHARIENS CULTIVÉS EN BLÉ :
CAS DE OUED RIGH**

Soutenue le 02 juillet 2017 devant la Commission d'examen composée de

Président	CHELOUFI Hamid	Professeur (Université Ouargla)
Directeur de thèse	DADDI BOUHOUN Mustapha	Professeur (Université Ouargla)
Rapporteurs	HAMDI-AISSA Belhadj	Professeur (Université Ouargla)
	BRINIS Louhichi	Professeur (Université Annaba)
	BENKHELIFA Mohammed	Professeur (Université Mostaganem)
	BENSLAMA Mohamed	Professeur (Université Annaba)

Année Universitaire 2016/2017

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

وَآیَةٌ لَهُمُ الْأَرْضُ الْمَیْتَةُ أَحْیَیْنَاهَا وَأَخْرَجْنَا مِنْهَا حَبًّا فَمِنْهُ
يَأْكُلُونَ (33 یس)

Au Nom d'Allah, le Clément et le Plus Miséricordieux

Une preuve pour eux est la terre morte, à laquelle Nous redonnons la vie, et d'où Nous faisons sortir des grains dont ils mangent

(33 Yaseen)

In the name of Allah, the Entirely Merciful, the Especially Merciful

A Sign for them is the earth that is dead: We do give it life, and produce grain therefrom, of which ye do eat

(33 Yaseen)

MIHOUB Adil

**Étude de la dynamique du phosphore dans les
sols calcaires sahariens cultivés en blé**

Cas de Oued Righ

ملخص

تهدف الدراسة التي أجريت على مستوى منطقة وادي ريغ بشأن توافر و جاهزية الفوسفور في التربة الكلسية لهدف تحسين ممارسة التسميد الفوسفاتي والتنبؤ بإحتياجات الفوسفورية للمحاصيل وخاصة القمح وفي هذا السياق، يمثل هدفنا العام في دراسة تأثير وجود كربونات الكالسيوم بكميات مرتفعة في التربة على الحد من توافر و جاهزية عنصر الفوسفور و على نمو و تطور القمح، وذلك من أجل زيادة إنتاجه الترب الكلسية المزروعة بالقمح و إدارة خصوبة التربة عن طريق ترشيد إستخدام الأسمدة المكلفة للغاية منها الفوسفورية. وأظهرت النتائج أن التسميد الفوسفاتي لهذه الأنواع من الترب يمكن أن يركز بشكل أفضل على محتواها من مادة كربونات الكالسيوم، و من خلال دراسة إمتزاز الفوسفور عن طريق معادلات كل من لانكماير و فرندلح تمكنا من وصف عملية الإمتزاز الفوسفوري مع تحديد خصائصها و كذلك تحديد المتطلبات الفوسفورية للتربة و النبات. وتشير النتائج إلى أن تغذية القمح بمادة الفوسفور يمكن تحسينها بإستخدام الفوسفور على شكل مركبات عضوية-فوسفورية. وسجلت نسبة الفوسفور في القمح ما متوسطه 0,171% في التربة المسمدة بالمركبات العضوية-الفوسفورية. ومع ذلك، إذا تم إستعمال الفوسفور وحده كان تركيز الفوسفور في القمح أقل أي ما متوسطه 0,100%. بالنسبة لإمتصاص الفوسفور في العينات الشاهدة و التي تم فيها إستعمال الفوسفور وحده كان ما مقداره 0,447 ملغ في الأبيص. أما في العينات المعدلة و المسمدة بإستخدام الفوسفور على شكل مركبات عضوية-فوسفورية كان إمتصاص الفوسفور أكبر أي ما يعادل 0,813 ملغ في الأبيص. ولتحقيق النمو الأقصى أي ما يكافئ 95 في المائة من مردود المادة الجافة، يتطلب القمح في هذه الظروف تركيزا قدره 0,326 ملغ من الفوسفور في محلول التربة. ومع ذلك، فقد وفرت الأسمدة الفوسفورية المدججة مع المواد العضوية كمية الفوسفور في محلول التربة المطلوبة في هذه الحالة، وكانت الإحتياجات القمح من الفوسفور حوالي 0,29 مغ من الفوسفور في محلول التربة. بالإضافة إلى ذلك، تحسنت كفاءة إمتصاص الفوسفور بنسبة تفوق 73% مقارنة بالتربة التي لم تتم معالجتها بهذه المركبات العضوية. وتستخدم نتائج هذا البحث للحد من تأثير كربونات الكالسيوم على توافر الفوسفور ولتحسين إمتصاص هذا الأخير في التربة الكلسية المزروعة بالقمح. كل ذلك، بهدف ضمان مردودية جيدة للمحاصيل الإستراتيجية مثل القمح من خلال إدارة مزرعية أفضل مما تسمح بالإستغلال الأمثل للموارد المائية و التربة بالإضافة إلى حوكمة إستعمال الأسمدة الفوسفورية.

الكلمات المفتاحية : فسفور، حركية، تسميد، تربة كلسية، قمح، وادي ريغ، الجزائر.

Auteur : Adil MIHOUB

Titre : Étude de la dynamique du phosphore dans les sols calcaires sahariens cultivés en blé : Case de Oued Righ

Directeur de thèse : Mustapha DADDI BOUHOUN

Résumé

L'étude réalisée au niveau de la région de Oued Righ sur la biodisponibilité du phosphore (P) dans les sols calcaires et son amélioration a pour objectif de mieux pratiquer de fertilisation phosphatée et de prédire l'exigence phosphatée des cultures notamment de blé. Une évaluation fiable de la biodisponibilité du phosphore passe en premier lieu par la quantification des différents paramètres régissant la sorption du phosphore. Dans ce contexte, notre l'objectif général est de faire une analyse de l'effet d'une présence du calcaire sur la limitation en phosphore et sur le développement et la croissance du blé, cela afin d'augmenter la productivité des sols cultivés et de gérer la fertilité des sols en diminuant l'utilisation des intrants très coûteux en engrais P. Les résultats ont montrés que la fertilisation phosphatée de ces sols pourrait mieux être rationalisée selon leurs teneurs en calcaire, et à travers les isothermes de sorption employés (Langmuir et Freundlich), la sorption de phosphore et ces indices descriptifs, les exigences phosphoriques des sols et de blé ont été déterminés. Les résultats indiquent que l'alimentation phosphatée du blé pourrait être améliorée par l'application du phosphore sous forme de complexes organo-phosphatés. La teneur en phosphore du blé a enregistré une moyenne de 0,171% dans les sols amendés par les substances organiques. Cependant, si le phosphore est appliqué seule la concentration de phosphore était de 0,100%. L'absorption de phosphore dans les pots de témoins était de 0,447 mg P pot⁻¹. Toutefois, dans les pots amendés avec des substances organiques l'absorption moyenne de phosphore était de 0,813 mg P pot⁻¹. Pour atteindre un rendement maximum près à 95%, le blé a exigé une concentration de 0,326 mg P L⁻¹. Cependant, les apports combinés d'engrais phosphaté avec les substances organiques ont économisé la quantité du phosphore en solution du sol qu'il faut dans ce cas, les besoins en phosphore de blé étaient de 0,29 mg P L⁻¹. En outre, l'efficacité d'absorption du phosphore de blé a été améliorée de 73% par rapport aux sols non traités par ces composés organiques. Les résultats de ce travail servent à limiter l'action du calcaire sur la rétrogradation du phosphore et d'optimiser l'assimilation de ce dernier dans les sols calcaires cultivés en blé. Tous cela, dans le but d'assurer la rentabilité des cultures stratégiques comme le blé par une meilleure conduite culturale permettant une valorisation optimale des ressources hydro-édaphiques et des apports fertilisants de type phosphaté.

Mots clés: Phosphore, dynamique, fertilisation, sol calcaire, blé, Oued Righ, Algérie.

Author : Adil MIHOUB

Title : Study of phosphorus dynamics in Saharan calcareous soils cultivated by wheat : Case of Oued Righ

Ph.D Supervisor : Mustapha DADDI BOUHOUN

Summarys

The study carried out at the Oued Righ region on the bioavailability of phosphorus (P) in calcareous soils and its improvements aim to better practice of phosphate fertilization and predict P requirements of crops. A reliable evaluation of the disponibility of P passes initially by the quantification of the various parameters governing the sorption (adsorption and precipitation) of phosphorus. In this context, the general aim of this research was to perform an analysis of the effect of the presence of limestone on the P limitation in soil and growth, and development of wheat in order to maintain the fertility of the soil by reducing the use of expensive inputs of P fertilizers. The results showed that soil phosphate fertilization could be better rationalized according to their levels of limestone, and through the sorption isotherms used (Langmuir and Freundlich), phosphorus sorption and these descriptive indices, phosphorous requirements of soil and wheat have been determined. The results indicate that the phosphate feeding of wheat could be improved by the application of phosphorus in the form of organo-phosphate complexes. The phosphorus content of wheat recorded an average of 0,171% in soils amended by organic substances. However, if phosphorus is applied only the phosphorus concentration was 0,100%. Phosphorus uptake in the control pots was 0,447 mg p pot⁻¹. However, in pots amended with organic substances the mean absorption of phosphorus was 0,813 mg P pot⁻¹. To achieve a maximum yield of about 95%, wheat required a soil solution concentration of P 0,326 mg P L⁻¹. However, combined application of phosphate fertilizers with organic substances have saved the amount of phosphorus in soil solution that is required in this case, the phosphorus requirements for wheat were 0,29 mg P L⁻¹. In addition, the absorption efficiency of phosphorus by wheat improved by 73% over soils not treated by these organic compounds. The results of this work are used to limit the effects of limestone on the sorption of phosphorus and to optimize its assimilation in calcareous soils cultivated by wheat. All of this, with the aim of ensuring the profitability of strategic crops such as wheat through better practical wheat crop management, allowing optimum and economic use phosphorus fertilizers inputs with safeguarding hydro-edaphic resources.

Keywords: Phosphorus, dynamics, fertilization, calcareou soil, wheat, Oued Righ, Algeria.

Dédicaces et Avant-propos



Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut...

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour,

Le respect, la reconnaissance...

Aussi, c'est tout simplement que



Je dédie cette

Thèse... 

"
"
"

"
"
"
"
"
"

Dédicaces

"
"
"
"
"

... À l'esprit de ma chère maman, que Dieu l'offre le paradis...

... À mon cher père, que Dieu lui donne longue vie et santé...

... À ma très chère épouse ...

*Ton encouragement et ton soutien étaient la bouffée d'oxygène
qui me ressourçait dans les moments pénibles, de solitude et de souffrance*

... À ma perle, ma petite-fille LAYANO SERINE ...

... À mes frères...

... À mes sœurs...

... À toute ma famille...

... À mes amis...

*... À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce
travail...*

... À mon pays et à moi-même aussi...

"

"
S

Avant-propos

"
"
"

Avant de commencer je remercie avant tout Allah tout puissant, de m'avoir guidé toutes ces années d'étude et de m'avoir donné la volonté, la patience, le courage pour terminer ce travail. Je dédie ce travail également à la mémoire du Professeur *Mr. SAKER Mohamed Lakhdar* mon co-directeur pour m'avoir fait confiance tout au long de mon cheminement.

J'adresse mes sincères remerciements :



**À NOTRE MAÎTRE ET PRÉSIDENT DE THÈSE
'MONSIEUR LE PROFESSEUR Hamid CHELOUFI'**
(Université KASDI MERBAH - Ouargla)

Nous sommes très sensibles à l'honneur que vous nous avez fait en acceptant la présidence de notre jury de thèse. Vos qualités scientifiques, pédagogiques et surtout humaines seront pour nous un exemple à suivre dans l'exercice de notre profession. Et nous tenons à vous remercier pour le meilleur accueil que vous nous avez réservé. Veuillez croire à l'expression de notre grande admiration et notre profond respect.



**À NOTRE MAÎTRE ET RAPPORTEUR DE THÈSE
'MONSIEUR LE PROFESSEUR Mustapha DADDI BOUHOUN' Y'**
(Université KASDI MERBAH - Ouargla)

Nous vous reconnaissons la gentillesse et la spontanéité avec lesquelles vous avez bien voulu diriger ce travail. Vous vous y êtes grandement impliqués par vos directives, vos remarques et suggestions, mais aussi par vos encouragements dans les moments clés de son élaboration. Nous tenons à vous remercier aussi pour cette liberté que vous avez permise, votre manière de penser et de procéder, votre manière d'être, bref toute votre personnalité.



**À NOTRE MAÎTRE ET JUGE DE THÈSE
'MONSIEUR LE PROFESSEUR Belhadj HAMDI-AISSA'**
(Université KASDI MERBAH - Ouargla)

Nous vous sommes très reconnaissants de l'honneur que vous nous faites en acceptant de juger ce travail. Vous avez eu l'amabilité de discuter avec nous certains points clés de notre analyse, vos remarques pertinentes contribueront sans doute au perfectionnement du présent travail. Nous avons toujours admiré vos qualités humaines et

professionnelles ainsi que votre compétence et votre disponibilité chaque fois que vous étiez sollicités



**À NOTRE MAÎTRE ET JUGE D'ÉTÈSE
'MONSIEUR LE PROFESSEUR Louhichi BRINIS'**
(Université BADJI MOKHTAR – Annaba)

Nous vous sommes très reconnaissants de l'honneur que vous nous faites en acceptant de juger ce travail. Vos qualités humaines et professionnelles jointes à votre compétence et votre disponibilité seront pour nous un exemple à suivre dans l'exercice de notre profession. Veuillez accepter, cher Maître, l'assurance de notre estime et profond respect.



**À NOTRE MAÎTRE ET JUGE D'ÉTÈSE MONSIEUR
LE PROFESSEUR Mohammed BENKHELIFA'**
(Université IBN BADIS–Mostaganem)

Nous vous sommes très reconnaissants de l'honneur que vous nous faites en acceptant de juger ce travail. Nous avons toujours admiré vos qualités humaines et professionnelles ainsi que votre compétence et votre disponibilité chaque fois que vous étiez sollicités.



**À NOTRE MAÎTRE ET JUGE D'ÉTÈSE 'MONSIEUR
LE PROFESSEUR Mohamed BENSLAMA'**
(Université BADJI MOKHTAR – Annaba)

Nous vous sommes très reconnaissants de l'honneur que vous nous faites en acceptant de juger ce travail. Je vous remercie également pour les discussions que j'ai eu la chance d'avoir avec lui, vos suggestions et vos conseils précieux.

*Je tiens à remercier particulièrement monsieur : **Pr. NAEEM Asif** (Professeur à l'institut nucléaire pour l'agriculture et la biologie (NIAB), Pakistan). **Pr. GHAFOR Ahmed Mam Rasul** (Département du sol et sciences des eaux, Université Sulaimani, Iraq). **Dr. QUDRAT Khan** (Département des sciences du sol, Université Gomal, Pakistan) dont la contribution a été considérable dans les procédures d'analyses, l'application des modèles, la publication des articles.*

*Ma gratitude va aussi au **Pr. LAKHDARI Fattoum** (directrice du centre de recherche scientifique et technique sur les régions arides, CRSTRA), au **Dr. BENAÏSSA Mohamed Hocine** (Maître de recherche et directeur de la station biophysique, Touggourt) dont l'aide a été inoubliable dans la réalisation de notre recherche.*

Index des acronymes, des symboles, et des sigles

ΔG	Énergie libre de Gibbs (Gibbs Free Energy)
<i>A</i>	Capacité de sorption de phosphore
ABHS	Agence de bassin hydrographique Sahara
AC	Acide citrique (C ₆ H ₈ O ₇)
ANOVA	Analyse de la variance
ANRH	Agence nationale des ressources hydriques
AO	Acide oxalique (H ₂ C ₂ O ₄)
AOFPM	Acides organiques de faible poids moléculaire
C	Concentration en phosphore dans la solution du sol
CaCl₂-P	Phosphore soluble extrait avec 0,01 M CaCl ₂
CaCO₃	Calcaire
CPCS	Commission de pédologie et de cartographie des sols
C_{pe}	Phosphore restant en solution après une semaine d'incubation
C_{pi}	Concentrations en phosphore des solutions initiales pour les isothermes d'adsorption
CRSTRA	Centre de recherche scientifique et technique sur les régions arides
DM	Matière sèche produite
EAP	Efficacité d'absorption de phosphore
ED	Eau distillée
EF	Extrait de fumier
EPR_{0,2}	Exigences externes du sol en phosphore pour atteindre le niveau de 0,2 mg de P L ⁻¹ dans la solution du sol
EUP	Efficacité de l'utilisation de phosphore
FAO	Food and agriculture organization
ITGC	Institut technique des grandes cultures
K	Affinité de rétention du phosphore par le sol

<i>K_{oc}</i>	Coefficient de partage carbone organique/eau
LP	Potentiel de calcaire
LR	Longueur de la racine
LT	Longueur de la tige
MAP	Mono - Ammonium - Phosphate
<i>N</i>	Énergie de sorption de phosphore
Olsen-P	Phosphore assimilable extrait avec 0,5 M NaHCO ₃ (méthode Olsen)
ONFAA	Observatoire national des filières agricoles et agroalimentaires
ONM	Office national de météorologie
P	Phosphore
<i>P_{con}</i>	Concentration en phosphore dans la plante
<i>P_{exp}</i>	Exportation de phosphore par la plante
PP	Potentiel de phosphate
PPE	Efficacité de phosphore apporté
PTM	Pouvoir tampon maximum
RMS	Rendement de la matière sèche
SOC	Teneur en carbone organique du sol
TSP	Triple - Super - Phosphate
WRB-FAO	World reference base for soil resources
X	Quantités de phosphore retenues par le sol
<i>X/X_{max}</i>	Degré de saturation du phosphore
<i>X_{max}</i>	Capacité maximale d'adsorption de phosphore

"

Table des tableaux

TABLEAU	TITRE	PAGE
I-1	Composés organiques phosphatés communs (Turner et <i>al.</i> , 2005b)	10
I-2	Relation entre les éléments nutritifs (Loué, 1987)	22
I-3	Niveaux d'effervescences du sol par réaction HCl et de teneurs en CaCO ₃	28
I-4	Différents composés de phosphates de calcium (Stumm et <i>al.</i> , 1996)	33
I-5	Teneur en P dans les organes du blé (Gervy, 1970)	38
I-6	Classification des cultures selon leurs exigences en P ₂ O ₅ (Soltner, 2005)	39
II-1	Données climatiques moyens de la région de l'Oued Righ entre 2004 et 2013 (ONM Touggourt, 2014)	43
II-2	Quelques caractéristiques des acides organiques utilisés	61
II-3	Quelque propriété chimique des acides organiques utilisés	65
II-4	Quantité de calcaire apporté pour avoir des traitements à 25 % CaCO ₃	65
II-5	Doses de phosphores testés et quantités d'engrais apportés	66
II-6	Quantité de calcaire apporté pour avoir des traitements à 50 % CaCO ₃	70
II-7	Teneurs initiales en phosphore assimilable (Olsen) et quantité d'engrais ajoutée pour différents traitements	70
III-1	Quelques caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés	75
IV-1	Résultats concernant l'isotherme d'adsorption du phosphore des sols étudiés	77
IV-2	Les paramètres de la sorption du phosphore dans les sols calculés par l'isotherme de Langmuir	78
IV-3	Les paramètres de la sorption du phosphore dans les sols calculés par l'isotherme de Freundlich	80
IV-4	Exigences en phosphore des sols calculé à partir de la forme linéaire des isothermes de Freundlich et Langmuir afin	84

	d'établir une solution du sol avec 0,2 mg P L ⁻¹	
IV-5	Relations entre tous les paramètres étudiés	85
V-1	Les paramètres de Freundlich des sols sans et avec traitement par l'acide citrique et oxalique	90
V-2	Paramètres relatifs à l'adsorption du P dans les sols sans et avec traitement par l'acide citrique et oxalique	91
V-3	Besoins en phosphore des différents traitements	96
V-4	Effet des acides organiques sur quelques paramètres chimiques des sols après une incubation de 30 jours	97
V-5	Relations entre les paramètres calculés et les indices d'adsorption du phosphore ($n = 24$)	99
V-6	Analyse de variance, valeurs de F, et signification statistique	101
V-7	Données agronomiques de la culture de blé en réponse à l'application des différentes doses du phosphore	102
V-8	Matrice de corrélation entre les paramètres étudiés ($n = 45$)	108
VI-1	Évolution des teneurs en phosphore assimilable en fonction des périodes d'incubation en sol non amendé par calcaire	118
VI-2	Évolution des teneurs en phosphore assimilable en fonction des périodes d'incubation en sol amendé par le calcaire	120
VI-3	Les paramètres du model parabolique utilisé pour décrire la cinétique du phosphore dans les sols traités et non traité avec les acides organiques	127

§

Table des figures

FIGURE	TITRE	PAGE
I-1	Position du phosphore dans le tableau périodique (Vanden Bossche, 1999)	4
I-2	Cycle simplifié du phosphore du sol	12
I-3	Impact du pH sur la distribution des formes solubles du phosphore	19
I-4	Diagramme de solubilité des minéraux phosphatés en fonction du pH (Lindsay et Moreno, 1960)	20
I-5	Mécanisme de compétition de la matière organique (cercles gris) avec le phosphate sur les sites de fixation d'Al, Fe et Ca (Parent, 2002).	21
I-6	Les structures et les constants de dissociation de certains AOFPM dans des sols	24
I-7	Diagramme de solubilité des phosphates de Ca, Fe et Al (Stumm et al., 1996)	33
I-8	Exemple d'une équation adaptée de Langmuir à partir des données de la sorption de P	35
I-9	Exemple d'une équation adaptée de Freundlich à partir des données de la sorption de P	36
II-1	Situation géographique et administrative de l'Oued Righ (TESCO-VIZITERV, 1989 - modifiée)	42
II-2	Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausson de la région de Touggourt entre 2004 et 2013	45
II-3	Climagramme pluviométrique d'Emberger de la région d'étude	46
II-4	Les grandes unités géologiques au Sahara (Nesson, 1978)	47
II-5	Coupe hydrogéologique transversale du "CT" (UNESCO, 1972)	49
II-6	Organigramme synthétise la méthodologie de travail	51
II-7	Isotherme de Freundlich pour l'adsorption de P	66
II-8	Dispositif expérimentale adopté (essai de blé)	67

II-9	Dispositif expérimental adopté (essai en sol nu)	71
IV-1	Isothermes de Langmuir pour les sols étudiés	79
IV-2	Isothermes de Freundlich pour les sols étudiés	81
IV-3a	Relation entre les exigences en P et le phosphore dans la solution du sol calculé à partir de l'équation de Freundlich	86
IV-3b	Relation entre les exigences en P et le phosphore dans la solution du sol calculé à partir de l'équation de Langmuir	86
IV-4a	Relation entre la teneur en calcaire et les apports recommandés en phosphore calculés à partir de l'équation de Langmuir	87
IV-4b	Relation entre la teneur en calcaire et les apports recommandés en phosphore calculés à partir de l'équation de Freundlich	88
V-1	Isothermes d'adsorption du phosphore dans les sols étudiés	93
V-2	Variation de la quantité du P adsorbé des différents traitements	95
V-3	Production optimale de la matière sèche en fonction de la concentration en phosphore dans la solution du sol	104
V-4	Les besoins externes du blé en phosphore	109
V-5	Les besoins internes du blé en phosphore	110
V-6	Disponibilité du phosphore dans le sol en fonction de différents traitements appliqués	112
V-7	Variation de l'efficacité de l'engrais P appliqué au sol en fonction de différents traitements appliqués	112
V-8	Évolution de l'efficacité d'absorption du phosphore en fonction de différentes traitements et doses du P appliqués	114
V-9	Évolution de l'efficacité d'utilisation du phosphore par le blé en fonction de différentes traitements et doses du P appliqués	115
VI-1	Évolution du phosphore assimilable en fonction des périodes d'incubation dans les traitements non amendés en calcaire	119
VI-2	Évolution des teneurs en phosphore assimilable en fonction des différents traitements non amendés par calcaire	119
VI-3	Évolution du phosphore assimilable en fonction des périodes d'incubation dans les traitements amendés en calcaire	121

VI-4	Évolution des teneurs en phosphore assimilable en fonction des différents traitements amendés par calcaire	121
VI-5a	Évolution de la teneur en phosphore soluble en fonction du taux de calcaire dans les traitements non fertilisés	123
VI-5b	Évolution de la teneur en phosphore soluble en fonction des apports organiques dans les traitements non fertilisés	123
VI-6a	Évolution de la teneur en phosphore soluble en fonction du taux de calcaire dans les traitements fertilisés	124
VI-6b	Évolution de la teneur en phosphore soluble en fonction des apports organiques dans les traitements fertilisés	124
"		
"		
"		
"		
"		
"		
"		
"	"	
"	"	
"	" "	
"		

Sommaires

CHAPITRE	TITRE	PAGE
	ملخص	i
	Résumé	ii
	Summary	iii
	Dédicace et avant-propos	iv
	Index des acronymes, des symboles et des sigles	viii
	Table des tableaux	x
	Table des figures	xii
	Sommaire	xv
"	Introduction générale	1
PARTIE A : Assimilation du phosphore dans le système sol-blé		
I	I.1. Le phosphore dans le sol et ses fonctions dans la plante	4
"	I.1.1. Généralités sur le phosphore et ses caractéristiques chimiques	4
"	I.1.2. États du phosphore dans le sol	5
"	I.1.3. Différentes formes du phosphore dans le sol	6
"	I.1.4. Dynamique et transformations du phosphore dans le sol	11
"	I.1.5. Facteurs affectant la dynamique et la disponibilité de P dans le sol	14
"	I.2. Sols calcaires	27
"	I.2.1. Calcaire	27
"	I.2.2. Définition d'un sol calcaire	27
"	I.2.3. Origine du calcaire dans le sol	28
"	I.2.4. Classification des sols calcaires	29
"	I.2.5. Caractéristiques des sols calcaires	29
"	I.3. Problématique de l'adsorption du phosphore des sols calcaires	30
"	I.3.1. Etat du phosphore dans les sols calcaires	30
"	I.3.2. Modélisation de l'adsorption du phosphore dans le sol	33

"	I.4. Importance du phosphore dans la vie des céréales	37
"	I.4.1. Rythmes d'absorption du phosphore par la plante	37
"	I.4.2. Teneur des plantes en phosphore	38
"	I.4.3. Exigences nutritionnelles en phosphore des plantes	38
"	I.4.4. Facteurs influençant les prélèvements du phosphore par les céréales	39
<hr/>		
PARTIE B : Cadre de l'étude et démarche expérimentale		
II	II.1. Cadre de l'étude	41
	II.1.1. Présentation générale	41
"	II.1.2. Situation géographique et administrative	41
"	II.1.3. Caractéristiques climatiques	43
"	II.1.4. Synthèse climatique	44
"	II.1.5. Géologie et géomorphologie de la région	46
"	II.1.6. Hydrologie de la région	48
"	II.1.7. Aperçue pédologique	49
<hr/>		
	II.2. Approche méthodologique	50
"	II.2.1. Sols étudiés	52
"	II.2.2. Etude des sols échantillonnés	52
"	II.2.3. Etude de la dynamique du phosphore	53
<hr/>		
PARTIE C : Résultats des travaux de recherche et leurs interprétations		
III	III.1. Caractéristiques morphologiques des sols étudiés	73
"	III.2. Données analytiques des sols étudiés	74
<hr/>		
IV	IV.1. Construction des isothermes d'adsorption	76
"	IV.1.1. Modèle de Langmuir	78
"	IV.1.2. Modèle de Freundlich	80
"	IV.2. Evaluation des exigences en phosphore des sols	83
"	IV.3. Conclusion	89
<hr/>		
V	V.1. Effets des AOFPM sur la sorption de phosphore des sols calcaires	90
"	V.1.1. Effet de l'addition des acides organiques sur les indices d'adsorption de phosphore	90

"	V.1.2. Effet de l'addition des acides organiques sur les besoins phosphoriques du sol	96
"	V.1.3. Mobilisation de phosphore dans le sol	96
"	V.1.4. Matrice de corrélation	98
"	V.2. Effets des apports P-composés organiques sur le blé	100
"	V.2.1. Longueur de la tige, de la racine du blé	100
"	V.2.2. Production de la matière sèche	102
"	V.2.3. Teneur en phosphore du blé	105
"	V.2.4. Exportation du phosphore par le blé	105
"	V.2.5. Estimation des exigences en phosphore du blé	106
"	V.2.6. Disponibilité du phosphore pour le blé en présence des substances organiques	111
"	V.2.7. Effets des différentes substances organiques sur l'efficacité d'absorption et d'utilisation de phosphore par la culture du blé	113
"	V.2.8. Conclusion	115
<hr/>		
VI	VI.1. Impact de l'amendement organo-calcaire et phosphorique sur le P assimilable	118
"	VI.2. Impact de l'amendement organo-calcaire et phosphorique sur le P soluble	123
"	VI.3. Cinétique du phosphore dans le sol	126
"	VI.4. Conclusion	127
<hr/>		
	Conclusion générale	129
	Bibliographie	133
	Publication	

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le sommet mondial pour le développement durable à Johannesburg, en 2002, a défini ses objectifs comme suit : "*la lutte contre la pauvreté, la modification des modes de production et de consommation qui n'assure ni leur reproduction ni la protection et la gestion des ressources naturelles, indispensables au développement économique et social, sont les objectifs ultimes et les conditions essentielles du développement durable*". (Nations Unies, 2002). Dans ce cadre, il a été notamment recommandé d'accroître sensiblement la productivité agricole et la sécurité alimentaire, de façon à atteindre les objectifs de développement.

Les céréales et leurs dérivées constituent l'alimentation de base dans beaucoup de pays en développement, particulièrement dans les pays maghrébins. Le blé est l'une des principales céréales. Cette plante herbacée annuelle qui produit le grain dont on tire la farine pour faire notamment le pain et les pâtes alimentaires constitue la base de la ressource alimentaire de l'humanité. En effet, la production mondiale de blé en 2014 a été de 711,5 millions de tonnes (FAO, 2014).

En Algérie, le secteur des céréales est d'une importance cruciale au plan économique et même culturel. Actuellement, la superficie réservée à la céréaliculture (blés et orge) est de l'ordre de 3,4 millions d'hectares (ONFAA, 2015)¹. Malheureusement, la culture des céréales est fort ancienne en Algérie, ce sont pour cela les rendements moyens nationaux et plus particulièrement des blés (blé dur et tendre), reste généralement très faible. Cette faible production est souvent causée par l'influence des contraintes du milieu (aléas climatiques) associé, notamment à l'application réduite de l'itinéraire technique de la culture. Il est important de signaler que la littérature scientifique révèle que les progrès en matière de rendement chez les céréales sont à 50 % dus à l'application d'un itinéraire technique adéquat y compris la fertilisation.

Dans beaucoup de systèmes agricoles, le phosphore est un aliment minéral le plus limitant pour les plantes (Ramaekers et al., 2010). Le fait que le P soit un élément limitant et lié d'une part, à sa faible teneur dans les sols et, d'autre part, à sa très forte rétention par les constituants du sol. Ainsi, les ressources minérales en P peuvent être importantes mais

¹ ONFAA : Observatoire National des Filières Agricoles et Agroalimentaires

peu biodisponibles dans les sols présentant des pouvoirs fixateurs très élevés. L'utilisation de fertilisants phosphatés permet d'augmenter les stocks de P dans les sols notamment les fractions biodisponibles et de faire face aux problèmes de carence des plantes.

La dynamique du phosphore dans les sols met en jeu les réactions d'adsorption, désorption, fixation, précipitation et dissolution. En effet, le calcaire est considéré parmi les principaux facteurs impliqués dans la dynamique des éléments nutritifs essentiels pour les plantes, dont notamment le phosphore. Ces éléments existent en quantités variables dans trois états principaux : l'état ionique dans la solution du sol, directement disponible aux plantes, la forme adsorbée sur les constituants minéraux et organiques des sols et l'état fixé, ou ils deviennent peu ou pas disponibles aux plantes. Ces trois états sont continuellement en équilibre à travers des processus d'échange plus ou moins réversibles entre la solution du sol et la phase solide.

Dans certaines régions arides, les sols sont généralement riches en calcaire. Les sols calcaires sont ceux qui contiennent, sur tout ou partie de leur épaisseur, du carbonate de calcium (plus éventuellement d'autres carbonates) dans la terre fine (particules < 2 mm) ou, pour le moins, dans la fraction grossière (Ruellan, 1984). La présence du calcaire en quantités importantes, dans le sol, a une influence défavorable sur les propriétés physicochimiques, notamment sur la disponibilité et l'absorption des éléments minéraux nécessaires pour la vie végétale y compris le phosphore (Mihoub et Deraoui, 2014).

À l'heure actuelle, les pratiques de la fertilisation phosphatée ainsi que l'évaluation de la biodisponibilité du P dans les sols riches en calcaire restent évaluées exclusivement via l'utilisation de méthodes chimiques. Or, nous venons de voir que ces méthodes sont approximatives et qu'une approche mécaniste serait plus appropriée intégrant mieux les processus écologiques, et favorisant à la fois une production de qualité et le maintien de la productivité des sols sur le long terme. Cela implique notamment de développer les solutions pour avoir une meilleure fertilisation de productions agricoles.

Ce constat soulève la problématique de l'étude de la fertilisation phosphatée de la plante soumise à des limitations multiples (teneur en calcaire du sol, conditions agro-climatiques sahariennes). La principale question posée est : *comment dans un contexte de limitations multiples, les pratiques de la fertilisation phosphatée vont être améliorées ?* Il s'agit d'une part, d'augmenter la productivité des sols cultivés et de l'autre, de gérer la fertilité des terres en diminuant l'utilisation des intrants très coûteux (ex. les engrais). Cela

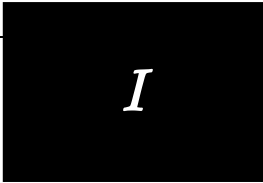
impose à la fois un respect des sols, ressources naturelles non renouvelables à l'échelle de l'homme et une connaissance de leur fonctionnement afin d'en assurer une gestion raisonnée.

Le problème du comportement du phosphore semble particulièrement important mais complexe. C'est pourquoi nous avons opté pour le thème « *Étude de la dynamique du phosphore dans les sols sahariens calcaires cultivés de blé* ». Pour atteindre cet objectif, nous avons réalisé différentes expérimentations dans lesquelles nous avons fait des essais sur des sols nus effectués au laboratoire et d'autres au champ sur des sols cultivés de blé. Pour cela, notre travail consiste à répondre aux questions spécifiques suivantes :

- Quels sont les effets propres d'une présence du calcaire sur la limitation en P et sur le développement et la croissance de la plante ?
- Comment peut-on estimer correctement les besoins en P dans un sol calcaire ?
- Y a-t-il une solution pour optimiser la fertilisation phosphatée et l'efficacité d'utilisation du P par la plante dans ces sols ?

Le présent travail, est une partie d'un programme de recherche sur la fertilisation phosphatée du blé dur en zones sahariennes mené sur plusieurs campagnes agricoles (Deraoui, 2011 ; Mihoub et Deraoui, 2014 ; Deraoui et *al.*, 2015a ; Deraoui et *al.*, 2015b ; Deraoui et *al.*, 2015c ; Mihoub et *al.*, 2016a ; Mihoub et *al.*, 2016b). L'objectif général de la thèse a alors été d'utiliser une telle approche afin de caractériser l'influence du calcaire sur la dynamique d'un facteur limitant "le phosphore" dans les sols et son influence sur l'alimentation phosphatée et la croissance de la plante.

ASSIMILATION DU PHOSPHORE DANS LE SYSTÈME SOL-BLÉ



"

Ce chapitre représente un rappel général sur la thématique de recherche et la problématique étudiée. Il traite trois grands volets : sur le blé et son importance (plante-test), les sols calcaires, le phosphore dans le sol et ses fonctions dans la plante et aussi les facteurs et processus physiques, chimiques et biologiques, régissant son comportement et son assimilation par la plante et enfin une synthèse bibliographique sur le comportement et la problématique du phosphore des sols calcaires.

I.1. Le phosphore dans le sol et ses fonctions dans la plante

I.1.1. Généralités sur le phosphore et ses caractéristiques chimiques

La découverte du phosphore remonte à 1669, par l'alchimiste hambourgeois Hennig Brandt (1669). C'est probablement le seul élément isolé initialement dans de la matière organique animale, puis végétale (Greenwood et Earnshaw, 1984). Il n'a été identifié dans l'apatite qu'en 1779 par Torben Bergman (1735-1784) et Joseph Louis Proust (1754-1826). Le phosphore provient de l'altération des roches, il est présent en quantités variables dans les minéraux silicatés, et surtout il entre dans la composition de près de 200 minéraux phosphatés, le principal minéral des sols est l'apatite (Frossard et *al.*, 1995). C'est élément du groupe 15 (Va) dans le tableau périodique des éléments (Fig. I-1), il possède par conséquent la couche de valence $3S^2-3P^3$.

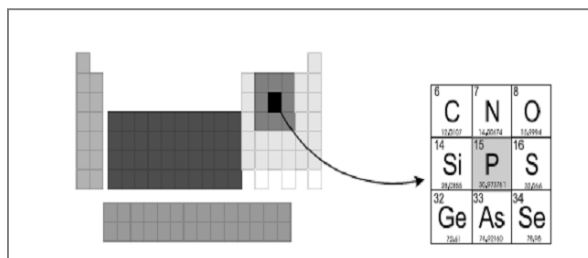


Figure I-1 : Position du phosphore dans le tableau périodique
(Vanden Bossche, 1999)

Le phosphore se trouve dans le groupe 15 du tableau périodique. Il a une masse atomique de 30,973 et est solide à 298 K et 1000 kpa. Il a une densité de 1,82 g mL⁻¹ à 293,2 K, de 317,4 K un point de fusion et d'ébullition de 553,2 K. Phosphore présente sous plusieurs formes (formes allotropiques) qui ont des propriétés très différentes. Les deux allotropes plus courants sont le phosphore blanc et le phosphore rouge. Le phosphore blanc est le moins stable, le plus réactif, plus volatil, moins dense et les autres formes allotropiques le plus toxique. Le phosphore blanc est thermodynamiquement instable à l'état normal et va changer progressivement le phosphore rouge. Le phosphore rouge peut être formé en chauffant le phosphore blanc à 523,2 K ou en exposant de phosphore blanc au soleil. Le phosphore rouge ne pas s'enflammer dans l'air à des températures inférieures à 533,2 K, tandis que le phosphore blanc s'enflamme à environ 300,2 K. Le phosphore violet, est une forme de phosphore qui peut être produite par le phosphore rouge au-dessus de 773 K. Le phosphore noir est l'allotrope moins réactif et la forme thermodynamique stable au-dessous de 823,1 K, il est également connu sous le nom de phosphore β métallique et possède une structure ressemblant plus à celui du graphite.

I.1.2. États du phosphore dans le sol

I.1.2.1. Phosphore total

Le phosphore total représente toutes les formes de phosphore présentes dans un échantillon de sol, qu'elles soient minérales ou organiques (Baize, 2000). Il comprend donc une fraction minérale et une fraction organique à des pourcentages de 5 à 95 % du phosphore total, une faible quantité est présente dans la solution du sol (0,002 à 2 mg L⁻¹) (Tarafdar et Claassen, 2004). Pierzynsky et *al.* (2000), suggèrent que la fraction minérale représente 50 à 70 % du phosphore total et le phosphore organique représente 25 %. La quantité de phosphore présente dans un sol est donc la conséquence directe de la richesse de la roche mère. Mais la connaissance de cette quantité ne donne qu'une indication très imparfaite sur l'aptitude du sol à fournir du phosphore aux végétaux et à satisfaire leurs exigences (Pereda Campos, 2008).

I.1.2.2. Phosphore assimilable

Le phosphore dit assimilable est alors défini pour caractériser la fraction du phosphore susceptible d'être absorbée par les racines, dont il est devenu nécessaire de corréler la production agricole à une quantité de phosphore dit « assimilable » ou « labile »

extrait par des procédures analytiques. Le terme du phosphore « labile » désigne la fraction du phosphore absorbé facilement par la plante et la fraction à extraire et à mesurer avec le phosphore soluble par les réactifs chimiques (Pierzynski et *al.*, 2000). En effet, dans le sol, il y a uniquement quelques kilogrammes de phosphore présents en solution dans le sol sous forme d'orthophosphates directement assimilables par les plantes (Frossard et *al.*, 2004 in Beaudin, 2008). Gervy (1970), estime qu'un sol est considéré comme riche en phosphore assimilable lorsque sa teneur dépasse 0,3 ‰, moyennement riche quand cette dernière est comprise entre 0,15 ‰ et 0,3 ‰, et pauvre quand elle est inférieure à 0,15 ‰. La forme dominante de P inorganique extraite du sol est orthophosphate (HPO_4^{2-} et H_2PO_4^- ions) qui peut être absorbé directement par les cellules végétales et microbiennes. Les Polyphosphates (y compris le pyrophosphate) sont des autres formes de phosphore inorganique qui peuvent être présents dans les sols, d'origine biologique et généralement en faible concentration par rapport à l'orthophosphate (Condrón et *al.*, 2005 ; Fardeau et *al.*, 1988). En pratique, la notion du phosphore assimilable est insuffisante ; de ce fait, on doit prendre en considération et exploiter certains nombres de paramètres à savoir : les interactions entre les composantes organiques et minérales du phosphore, les teneurs en solution et l'activité des racines et des microorganismes d'où la notion de « biodisponibilité du P ». D'après Frossard et *al.* (2004), cette biodisponibilité est définie comme étant la quantité totale de phosphore dans le sol susceptible d'aboutir dans la solution du sol sous forme d'ions orthophosphates pendant une période équivalente à la durée de croissance de la culture.

I.1.3. Différentes formes du phosphore dans le sol

Bien que le phosphore soit présent en grande quantité dans le sol, il est souvent sous forme non assimilable ou sous d'autres formes loin de la rhizosphère (Schachtman et *al.*, 1998). Le phosphore dans le sol est présent soit sous forme organique soit sous forme minérale. Pierzynsky et *al.* (2000), suggèrent que la fraction minérale représente 50 à 70% du phosphore total et le phosphore organique représente 25%. Les compartiments dans lesquels il est présent au niveau du sol sont :

- La roche mère qui comprend le P non assimilable par les plantes.
- Le complexe argilo-humique du sol auquel est lié le P et qui devient disponible à la plante au cours de la culture.
- La solution du sol qui elle contient le P immédiatement utilisable par les plantes.

Les différentes formes du phosphore sont contrôlées par les propriétés intrinsèques du sol tel que : le pH, les ions solubles échangeables (Fe^{2+} , Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+}) et la nature et la surface des particules du sol (Holford, 1989). Cet élément est chimiquement très réactif et les mécanismes de sa réaction dans le sol sont complexes (Azzaoui et *al.*, 1994). La disponibilité pour les plantes du P apporté est faible puisqu'on considère qu'environ 80% du P 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). Les différentes formes de P dans le sol sont classées selon différents critères : la nature des composés phosphorés, le fractionnement chimique ou l'échange ionique. La nature des composés phosphorés permet de séparer le P organique du P inorganique (Pereda Campos, 2008).

I.1.3.1. Forme soluble

La forme soluble du phosphore est localisée dans la solution du sol, forme ionisée de l'acide phosphorique H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-} dont les proportions relatives dépendent du pH du milieu concerné. Ces formes sont à l'origine de la nutrition phosphatée des cultures (Morel, 1996). Selon Pereda Campos (2008), le phosphore de la solution du sol constitue moins de 1 % du phosphore total, mais est la source principale pour les végétaux. La quantité de phosphore contenant dans la solution du sol est cependant faible du fait de la très faible solubilité de cet élément : entre 0,5 et 1 mg L^{-1} en moyenne, ce qui représente entre 0,04 et 1,6 kg P ha^{-1} (Doré et *al.*, 2006). Le phosphore labile est une fraction de grande importance en agriculture puisqu'elle est facilement disponible aux plantes et peut-être facilement lessivée (Hedley et *al.*, 1982 ; Sharpley et Moyer 2000). Cette fraction représente le phosphore présent dans la solution du sol, le phosphore organique facilement minéralisé et les phosphates faiblement retenus sur les colloïdes argileux (Demers, 2008).

I.1.3.2. Forme minérale

La partie du phosphore dit inorganique (minérale) peut constituer une part importante (sinon majoritaire) des réserves en phosphore du sol (Drouet, 2010). Une grande partie des connaissances concernant la nature du phosphore du sol repose sur les principes de produit de solubilité. Phosphore forme des composés insolubles avec le fer et l'aluminium à faible pH, composés plus solubles de calcium et de magnésium à des valeurs de pH près de neutralité et forme des composés insolubles à des pH plus élevés

(Tisdale et *al.*, 1985). Il y a une large gamme de solubilité de ces divers composés de phosphate et leur disponibilité aux cultures est généralement dans des valeurs de pH situent entre 6 à 7 pour les sols agricoles. En effet, les composés du phosphore inorganique sont principalement divisés en deux groupes : les composés de phosphore de calcium et de magnésium et les composés de phosphore de fer et d'aluminium. Hountin (1996), ajoute qu'il y a plus de 200 formes de phosphore minéral dans la nature ; les fluoroapatites sont les formes les plus couramment rencontrées sous forme de minerai et de composé de la plupart des sols cultivés. D'une façon générale, le phosphore insoluble, pas directement disponible, représente 95 à 99 % du phosphore total ; le phosphore absorbé ou précipité est principalement sous forme de phosphate de fer ou d'aluminium dans les sols acides et sous forme de phosphate de calcium et de magnésium dans les sols alcalins et calcaires. La distribution relative entre les différentes catégories et la disponibilité dépend notamment du pH du sol (Pereda Campos, 2008).

I.1.3.2.1. Phosphate de calcium et de magnésium

Ils se produisent dans les sols sous plusieurs formes, et les composés les plus importants sont donnés comme suit :

- a. $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, phosphate mono-calcique, est un composant soluble dans l'eau de superphosphate et réagit dans le sol pour former des produits moins solubles.
- b. $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et CaHPO_4 , phosphate di-calcique, bien hydratés et formes non hydratée respectivement, c'est deux formes sont faiblement solubles dans l'eau.
- c. $\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, phosphate Octa-calcique.
- d. $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, phosphate tri-calcique.
- e. $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, hydroxyapatite et $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}$, fluorapatite et
- f. $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, struvite, qui est alcalin et soluble dans l'eau.

La concentration de phosphore dans les sols calcaires ne correspond pas à une espèce minérale. Il peut être contrôlé par le phosphate octa-calcique dans certains sols ou par hydroxyapatite dans d'autres sols. L'hydroxyapatite dans le sol contient invariablement quelques ions carbonatés, ce qui le rend chimiquement plus réactive. La présence de phosphate octa-calcique a été signalée dans les sols qui ont été chaulées et fertilisées avec phosphates (Webber et Mattingly, 1970).

I.1.3.2.2. Phosphates de fer et d'aluminium

Un certain nombre de minéraux de phosphate d'aluminium et de fer ont été

signalés dans les sols. Les phosphates d'aluminium les plus courants sont : wavellite ($\text{Al}_3(\text{PO}_4)(\text{OH})_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) et variscite ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Le phosphate de fer le plus courant est : strengite ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Strengite est connu pour se cristalliser plus rapidement quand le phosphate de fer est formé. Le phosphate d'aluminium moins cristallin a une plus grande superficie qui est plus favorable pour la libération du phosphore dans la solution du sol. Dans des conditions très acides, les minéraux des groupes variscite et strengite sont précipitées (Wild, 1988).

I.1.3.3. Forme organique

Le phosphore organique est défini comme l'ensemble des composés organiques produits par des organismes vivants, comprenant un ou plusieurs groupes de Pi (au moins un Pi lié à un carbone par une liaison covalente, généralement une liaison ester). Il peut représenter 30 à 90 % du P total du sol (Jones et Oburger, 2011). Le P organique du sol se trouve sous diverses formes chimiques, mais principalement sous forme d'inositol-6-phosphate (phytate) et secondairement sous forme de sucres phosphatés, d'acides nucléiques et de phospholipides (Quiquampoix et Mousain, 2005). Pour être utilisé par les plantes et les micro-organismes, le P organique doit être minéralisé par des phosphatases qui sont des enzymes qui peuvent être d'origine animale, végétales ou microbienne (Richardson et Simpson, 2011). Le P organique peut être défini comme étant le P présent dans un composé organique en tant que constituant, c'est-à-dire le P ayant des liaisons avec le C ou le H (Turner et *al.*, 2005a). Le phosphore organique peut provenir des déchets végétaux ou des micro-organismes du sol. Selon Brookes et *al.* (1984 in Vanden Bossche, 1999), le phosphore microbien représente 2 à 24 % du phosphore organique du sol. Il existe de nombreux composés organiques contenant du P (Turner et *al.*, 2005a ; Turner et *al.*, 2005b). Les composés organiques sont classiquement divisés en plusieurs classes fonctionnelles (monoester, diester, polyphosphates organiques, phosphonate). Les quantités de phosphore organique varient considérablement entre les sols. Selon Campbell et Racz (1975), les teneurs en phosphore organique des sols s'oscillent entre 7 à 1056 mg kg⁻¹ de sol. Le phosphore organique représente de 20 à 80 % du phosphore du sol ; Il est présent sous forme de phosphore soluble dans la solution du sol et sous forme de phosphore insoluble absorbé sur les particules du sol ou comme composant de la matière organique du sol (Pereda Campos, 2008). La proportion du phosphore associé à des composés organiques varie selon les sols et leur type d'utilisation

de 30 à 65 % du phosphore total (Harrison, 1987 in Frossard *et al.*, 2004). La disponibilité du phosphore organique dans le sol dépend de la minéralisation par les enzymes phosphatase (Priya et Sahi, 2009). Cette forme du phosphore est essentiellement associée aux acides fulviques de faible poids moléculaire (Condron et Goh, 1989 in Vanden Bossche, 1999). Le phosphate organique est présent comme phosphates d'inositol, phospholipides, acides nucléiques et divers autres esters de phosphate qui est issue de la dégradation de la matière organique et ils sont souvent immobilisés par sorption et fixation aux colloïdes du sol (Marschner, 1995 in Pereda Campos, 2008). Le tableau I-1 présente quelques composés organiques fréquemment rencontrés pour ses différentes classes.

Tableau I-1 : Tableau récapitulatif des principaux composés naturels de P organiques pouvant être présents dans l'environnement (d'après Turner *et al.*, 2005b)

Composé	Formule chimique	Classe	Commentaire
Acide	$C_2H_8NO_4P$	Diester	
Acide ribonucléique		Diester	
<i>myo</i> -inositol hexakisphosphate (acide phytique)	$C_6H_{18}O_{24}P_6$	Monoester	Principal source de Po chez les plantes
D-chiro-inositol hexakisphosphate	$C_6H_{18}O_{24}P_6$	Monoester	Origine microbienne
α -Glucose 1-phosphate	$C_6H_{13}O_9P$	Monoester	Sucre répandu chez les plantes
Adénosine monophosphate	$C_{10}H_{14}N_5O_7P$	Monoester	
Adénosine 5'-diphosphate	$C_{10}H_{15}N_5O_{10}P_2$	Polyphosphate	
Adénosine 5'-triphosphate	$C_{10}H_{16}N_5O_{13}P_3$	Phospho-anhydride	
β -Glycérophosphate	$C_3H_9O_6P$	Monoester	Synthétisé par le clivage enzymatique de
Phosphoénolpyruvate	$C_3H_5O_6P$	Monoester	Commun chez les plantes
L- α -phosphatidyl ethanolamine	$C_7H_{12}NO_8P(2R)$	Diester	Phospholipide chez les microorganismes
L- α -phosphatidyl-L-sérine	$C_8H_{12}NO_{10}P(2R)$	Diester	Phospholipides chez les mammifères
Polyphosphate (linéaire)	$H_nO_{3n+1}P_n$	Phospho-anhydride	Origine microbienne
Pyrophosphate	$H_4O_7P_2$	Phospho-anhydride	
Phosphocreatine	$C_4H_{10}N_3O_5P$	Monoester	Commun chez les muscles des vertébrés

I.1.4. Dynamique et transformations du phosphore dans le sol

Le cycle de P dans le sol est un système dynamique impliquant le sol, les plantes et les micro-organismes. On peut définir la dynamique du phosphore comme étant le passage des ions phosphatés d'un état à un autre sous l'effet des mécanismes physicochimiques et biologiques. En sols sahariens, Mesmoudi (1999) suggère que la solubilité et la dynamique des ions phosphatés méritaient d'être étudiées plus complètement. Les transformations de phosphore dans les sols répondent à des mécanismes complexes : minéralogiques, chimiques, physicochimiques et biologiques (Frossard et *al.*, 2000). Les procédés chimiques comprennent précipitation et dissolution, tandis que les processus physiques et chimiques comprennent l'adsorption et la désorption et les processus biologiques impliquent l'immobilisation et la minéralisation. Les processus physicochimiques et chimiques qui influent sur les formes de P du sol et leur disponibilité sont discutés dans la section suivante.

I.1.4.1. Processus chimiques et physiques et chimiques

Elle peut s'expliquer par le transfert des ions phosphatés de la phase solide vers la solution du sol et vice versa. Au bien les mouvements des ions phosphatés, entre les combinaisons phosphatées et la solution du sol (Fig. I-2).

I.1.4.1.1. Adsorption

A court terme, les principaux facteurs responsables de l'absorption et de la fixation des ions phosphatés sont les oxydes d'aluminium et de fer libres ainsi que le calcium et le magnésium sous formes échangeables ou sous forme de carbonates (Giroux et *al.* 1996 in Gagnon et Beaulieu, 2002). L'adsorption des ions phosphates à la surface de certaines particules (particules d'oxydes et d'hydroxydes de fer et d'aluminium, sels de calcium) résulte de différents mécanismes de fixation correspondant à des adsorptions physiques et chimiques mettant en jeu des liaisons de nature électrostatique entre les ions et les constituants solides (Jaillard et Hinsinger, 1993 in Maire, 2005).

I.1.4.1.2. Désorption

C'est la libération du phosphore de la phase solide à la phase liquide. Ce phénomène a lieu suite à la diminution de la concentration en phosphore dans la solution du sol par les prélèvements des plantes. Seulement une faible quantité des ions adsorbés peuvent être résorbés facilement ; la plupart des ions phosphatés apportés au sol sont fixés et ne font pas l'objet d'une désorption et n'ont pas la même mobilité (Pierzynski et

al., 2000).

I.1.4.1.3. Précipitation

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

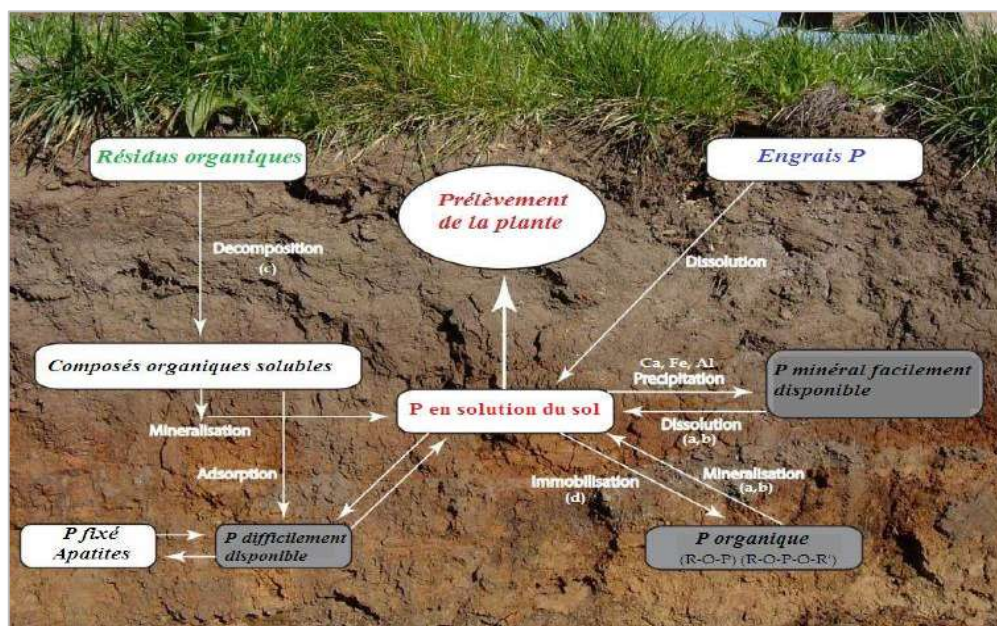
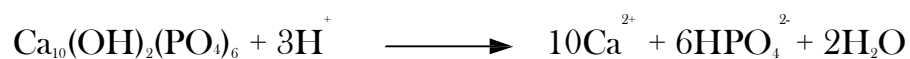


Figure I-2 : Cycle simplifié du phosphore dans le sol (inspiré de Plassard et al., 2015)

La figure I-2 représente le cycle simplifié du P montrant la répartition du stock total de P du sol entre les différents pools de P. La plante ne peut utiliser que le pool de phosphate inorganique (Pi) libre dans la solution du sol à partir duquel elle absorbe les ions orthophosphates ($\text{H}_2\text{PO}_4^-/\text{HPO}_4^{2-}$). Une meilleure exploration du sol permet d'augmenter l'accès au pool de Pi libre. Le pool de Pi libre est alimenté par le pool de P minéral plus ou moins facilement disponible via les phénomènes de dissolution et/ou de solubilisation. Il peut aussi être alimenté par la minéralisation du P complexé au carbone via des liaisons monoester (R-O-P) ou diester (R-O-P-O-R') constituant le P organique du sol. Dans un sol, le pool de Pi libre représente une infime fraction du P total du sol. Les différentes fonctions sont influencées par les variations de pH (a) ; la production d'anions organiques (b) ; la production de phosphatases ou de phytases (c) et l'immobilisation de P dans la fraction microbienne du sol (d).

I.1.4.1.4. Dissolution

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



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

I.1.4.2. Procédés biologiques

I.1.4.2.1. Minéralisation

Les sources initiales de P organique sont les résidus animaux et végétaux, qui se décomposent sous l'action de micro-organismes pour produire d'autres composés organiques et du P inorganiques. Une large gamme de micro-organismes du sol qui est capable de minéraliser le P organique P. La quantité de P minéralisé pendant une saison de croissance varie considérablement entre les sols selon les caractéristiques du sol et des

conditions environnementales.

I.1.4.2.2. Immobilisation

L'engrais phosphaté peut être immobilisé à un P organique par les micro-organismes du sol. Les recherches ont montré que les applications continues d'engrais P pourraient conduire à une augmentation de P organique dans le sol (Zhang et MacKenzie, 1997) et ces augmentations ont lieu par immobilisation nette de P dans les résidus de culture et de la conversion de P inorganique disponible dans la biomasse microbienne (Mc Laughlin et *al.*, 1977). Les transformations de P dans le sol sont influencées par différents facteurs tels que le pH, texture, teneur en matière organique, la quantité de CaCO₃, et oxydes d'Al, température et d'humidité du sol. Toutefois, dans un sol agricole donné, les applications d'engrais qui modifient l'état de la matière organique du sol et les concentrations de phosphore dans la solution du sol, sont les principaux facteurs qui influent sur les transformations dans le sol (Beck et Sanchez, 1994 ; Zhang et Mac Kenzie, 1997 ; Zheng et *al.*, 2002).

I.1.5. Facteurs affectant la dynamique et la disponibilité de P dans le sol

Les sols agricoles se distinguent par leurs caractéristiques physiques (texture, humidité...), chimiques (pH, calcaire...), biologiques (racines, mycorhizes...) et leur pouvoir fixateur. Tous ces facteurs peuvent affecter l'évolution et le devenir des ions phosphoriques dans le sol. De nombreuses études ont démontré l'influence des propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol sur le comportement du phosphore (Giroux et Tran, 1994). Le pH, la concentration en Fe, Al et Ca, la texture et le contenu en matière organique sont autant de propriétés du sol qui affectent la disponibilité du phosphore (Mkhabela et Warman, 2005). Selon Ghazanshahi et Jaouich (2001), l'absorption et la disponibilité du phosphore dans le sol dépendent de plusieurs facteurs tel le pourcentage de la matière organique ; la biologie du sol d'où résultent la décomposition et la réorganisation des composés organiques et inorganiques phosphatés. De même la présence des colloïdes minéraux et organiques détermine la capacité d'échange des anions et des sites d'absorption des phosphates et influence l'absorption et la disponibilité du phosphore. La rhizosphère est le volume de sol où s'exercent à la fois des mécanismes physiques, chimiques et microbiologiques déterminant et contrôlant le transfert des ions phosphoriques entre le sol et la solution et des mécanismes physiques, chimiques et microbiologiques capables de mobiliser des ions phosphoriques lors du fonctionnement

du système sol-solution-plante (Morel, 2002).

a. Pouvoir fixateur

L'apport au sol de quantités de phosphore supérieures à celles autorisées par la valeur limite d'équilibre, conduit à une migration des ions phosphatés de la phase liquide vers la phase solide où ils sont adsorbés puis intégrés dans les structures minérales : c'est le processus qui portait le nom de « rétrogradation » est dit maintenant « pouvoir fixateur » (Fardeau, 1993). Donc, le pouvoir fixateur d'un sol traduit sa plus ou moins grande aptitude à fixer le phosphore sur la phase solide au détriment de la phase liquide (Pellerin et al., 2000). Pellerin et al. (2006) ont démontré que la capacité des sols à maintenir une intensité de phosphore en solution varie selon leur texture, leur genèse et leur pH. Des corrélations entre l'adsorption du phosphore et le taux d'argile ont été de nombreuses fois observées (Fox et Kamprath, 1970 ; Udo et Uzu, 1972 ; Loganathan et al., 1987 ; Owusu-Bennoah et Acquaye, 1989 ; Solis et Torrent, 1989 ; Bennoah et Acquaye, 1989 ; Soon, 1991 ; Sanyal et al., 1993 in Dubus, 1997). La diminution de la disponibilité du phosphore est causée non seulement par la composition chimique du sol, mais il y a d'autres facteurs qui rentrent en jeu à savoir : l'activité des argiles, le CaCO_3 , les oxydes de fer et d'aluminium, les doses de phosphore ajoutées et le temps d'épandage (Affif et al., 1993 in Halajnia et al., 2009).

b. Facteurs physiques

- Humidité du sol

La dissolution du phosphore des engrais et de tous les composés amorphes et minéraux de phosphore dans le sol dépend de l'eau du sol ; l'eau affecte les réactions du sol en régissant la diffusion du phosphore dans la solution du sol et, finalement, la disponibilité du phosphore pour la croissance relative des racines (Barker et Pilbeam, 2007). Dans la plupart des conditions, le phosphore est appliqué près de la surface du sol. Ainsi, pendant des périodes sèches dans les systèmes de production non irrigués, les déficiences en phosphore peuvent surgir (Hanway et Olsen, 1980 in Barker et Pilbeam, 2007). Mullen (2003), a considéré que la gestion de l'humidité du sol influence d'une grande part sur la réponse profitable de la plante vis-à-vis des engrais phosphatés ; il ajoute que les racines de céréales peuvent arriver à des profondeurs d'un mètre ou de plus pour accéder à l'humidité et aux éléments nutritifs, particulièrement azote : quand l'humidité du sol est basse, le phosphore devient moins accessible.

- **Température du sol**

Les changements de température affectent plusieurs des mécanismes impliqués dans le prélèvement des éléments nutritifs par les plantes (Gagnon et Beaulieu, 2002). La température du sol affecte les réactions qui régissent la dissolution, l'adsorption et la diffusion du phosphore et affecte également le potentiel de prélèvement du phosphore par les racines (Barker et Pilbeam, 2007). Elle influence aussi la croissance racinaire (Ching et Barber, 1979 in Gagnon et Beaulieu, 2002) et la diffusion du phosphore dans le sol (Mackay et Barber, 1984 in Gagnon et Beaulieu, 2002). Si la température dont le phosphate réagit avec le sol est augmentée, la vitesse de réaction est considérablement augmentée (Barrow, 1989). Des températures élevées devraient légèrement augmenter la solubilité molaire des composés tels que l'apatite, hydroxyapatite, phosphate octacalcique, variscite et strengite. L'augmentation de la température stimule également l'activité biologique qui permet au phosphate d'être libéré de résidus organiques. Wild (1950) a estimé qu'une augmentation de la température de 298 K à 308 K a augmenté l'adsorption de P dans les sols. Les sols des régions chaudes au monde adsorbent généralement plus de phosphates que les sols des régions tempérées. Ces climats chauds également donnent lieu à des sols avec des teneurs plus élevées des oxydes de fer et d'aluminium hydratés. Beaucoup des études ont montré que la rétention du phosphore augmente à des températures plus élevées (Muljadi et *al.*, 1966 ; Kuo et Lotse, 1974 ; White et Taylor, 1977).

- **Texture du sol et minéralogie d'argile**

La texture influe sur la disponibilité du phosphore : lorsque la teneur en argile augmente, la rétention en phosphore augmente d'où un phosphore moins soluble dans les sols argileux que dans les sols sableux. Le type d'argile influe aussi, car la kaolinite et les oxydes de fer et d'aluminium retiennent beaucoup plus de phosphore que les argiles de type 2:1 (Badraoui et *al.*, 1995). Généralement, les niveaux de phosphore tendent à être moyens à élever sur des sols qui ont des textures plus lourdes. Dans des sols avec une texture plus légère, ils ont généralement des niveaux moyens à faible. Les sols ayant une texture plus légère répondent habituellement mieux à l'application des engrais phosphatés que des sols plus lourds (Mullen, 2003). Plusieurs travaux ont signalé une corrélation significative entre la teneur en argile et paramètres de sorption du P (Fox et Kamprath, 1970 ; Jones et *al.*, 1979 ; Ayodele, 1981, Morais et *al.*, 1996 ; Sharif et *al.*, 2000). La

teneur en argile d'un sol a un grand impact sur l'adsorption de phosphate. Les sols contenant de grandes quantités d'argile adsorbent plus de phosphates que celles qui ont moins d'argile. Les sols riches en kaolinite telle que celle qui sont trouvées dans les zones de fortes précipitations et des températures élevées, adsorbent plus grandes quantités de phosphates que ceux qui contiennent les types de 2:1. Une plus grande absorption de phosphate dans le premier cas est probablement due à des quantités plus élevées des oxydes hydratés de fer, de manganèse et d'aluminium associé les argiles kaolinitiques et autres minéraux argileux de type 1:1 (Hayne, 1990).

- **Aération et le compactage du sol**

L'oxygène, c'est élément vital pour le prélèvement du phosphore par les racines des plantes ; dans les sols compacts, la circulation de l'eau est limitée ce qui entraîne par conséquent une mauvaise diffusion du phosphore vers les racines et dans ce cas, la plante n'absorbe pas convenablement le phosphore. L'aération et le compactage du sol constituent deux facteurs qui influencent considérablement l'approvisionnement des racines en oxygène nécessaire pour leur croissance ; le compactage ou l'engorgement par l'eau du sol limitent le prélèvement du phosphore en le rendant moins disponible pour les plantes (Mullen, 2003).

- **Effet du temps**

L'adsorption du phosphore par les sols et les nombreuses composantes du sol suivent deux tendances distinctes : une première réaction rapide suivie d'une réaction très lente. La réaction d'adsorption entraîne des échanges de phosphate pour les anions et les ligands sur la surface des oxydes de fer et d'aluminium est extrêmement rapide (White, 1980 ; Tisdale et *al.*, 1985). Les réactions d'adsorption continuent plus lentement peuvent impliquer des changements tels que :

- Chemisorptions de phosphore adsorbé à la surface dans les constituants du sol, par exemple, l'incorporation du phosphore en aluminium hydroxy ou polymères de fer et l'occlusion du phosphore dans la surface de la calcite telle que suggérée par Griffin et Jurinak (1974).
- Précipitation d'un composé du phosphore pour lequel le produit de solubilité a été dépassé (Veitli et Sposito, 1977).

Ces réactions lentes impliquent un changement dans les formes de phosphore qui sont moins accessibles aux plantes. Un aspect pratique important du temps est la période après

l'application d'engrais. Sur certains sols avec une capacité d'adsorption élevée, la période de réaction est courte, alors que sur d'autres, la période peut durer des mois, voire des années.

c. Facteurs chimiques

- pH

Le pH du sol joue un rôle majeur dans la disponibilité du phosphore : quand le pH est inférieur à 6, la disponibilité de certains minéraux bénéfiques pour les plantes comme le phosphore est réduite (Michel, 2005). Une meilleure efficacité d'utilisation du phosphore peut être assurée moyennant une adéquation du pH du sol (Mengel, 1997). La solubilité des minéraux du phosphore et la concentration des sols en ions H_2PO_4^- et HPO_4^{2-} (formes les plus absorbées par les plantes) sont fortement dépendantes du pH (Azzaoui et al., 1994) (Fig. I-3). La plupart des études ont montré que les prélèvements du P chez les plantes supérieures sont très importants à pH situé entre 5 et 6 où le H_2PO_4^- est dominant (Furihata et al., 1992). Les mêmes auteurs rapportent que dans les sols très acides, le mono-calcium de phosphate (forme de phosphore dans les engrais) est rapidement précipité sous forme de P-Fe et P-Al alors que dans les sols calcaires, il y a la formation du di- et tri-calcium de phosphate de moindre solubilité et qui sont par la suite, graduellement convertis en carbonate d'apatite (Mengel, 1997). Les réactions réduisant la disponibilité du P se produisent à toutes les valeurs de pH, mais sont plus prononcées dans les sols alcalins ayant un pH >7.3 et dans les sols acides ayant un pH $<5,5$ (Demers, 2008). La figure II-3 illustre l'importance du pH dans la fixation du P. Les conseils de fertilisation phosphatée tiennent compte de cette perte et sont donc augmentée. Ainsi par exemple, dans les sols calcaires, la fumure d'entretien doit être portée à 50% au-dessus des exportations pour parer à l'effet de rétrogradation du P (Azzaoui et al., 1994). Dans les sols à pH alcalin > 7 , ce qui est le cas de la majorité des sols Algériens, le phosphore contenu dans les réserves est indisponible, il faut donc l'apporter sous forme soluble et acide permettant une dynamique d'échange dans la solution (Bennai et Benabbas, 2007). Les travaux de Devau et al., (2009) montrent l'importance du pH sur la disponibilité du phosphore en modifiant l'adsorption des ions phosphates. Par ailleurs, le phosphore apporté au sol par les engrais phosphatés peut être précipité par les formes libres de calcium, de fer ou d'aluminium plus ou moins abondants selon le type de sol, et conduire à la néoformation de minéraux stables (Tisdale et al., 1985). Selon le cation, la même

variation de pH produit des effets opposés, car une acidification augmente la solubilisation des phosphates de Ca alors qu'elle diminue la solubilité des phosphates de Fe et d'Al (Fig. I-4). Les variations de pH dans la rhizosphère engendrée par les racines ou les micro-organismes peuvent fortement modifier le potentiel d'adsorption des minéraux, et donc la disponibilité de Pi (Geelhoed *et al.*, 1999), conduisant finalement à la libération de Pi au profit de compartiments plus disponibles pour la plante. Devau *et al.* (2010) ont développé une approche de modélisation mécaniste qui a révélé que l'augmentation du pH dans la rhizosphère de blé dur a également affecté la charge de surface des minéraux argileux dans les sols neutres, et par conséquent, la désorption de Pi adsorbée sur ces minéraux qui sont abondante dans la plupart des types de sols. De plus, ces auteurs ont montré que la concentration en Ca affectait fortement les charges de surface des minéraux argileux, charges qui sont donc susceptibles de changer à la suite de l'absorption de Ca par les racines. Finalement, cette approche de modélisation a permis de montrer qu'une augmentation, aussi bien qu'une diminution, de pH pouvait entraîner une augmentation de la disponibilité du P du sol (Devau *et al.*, 2011).

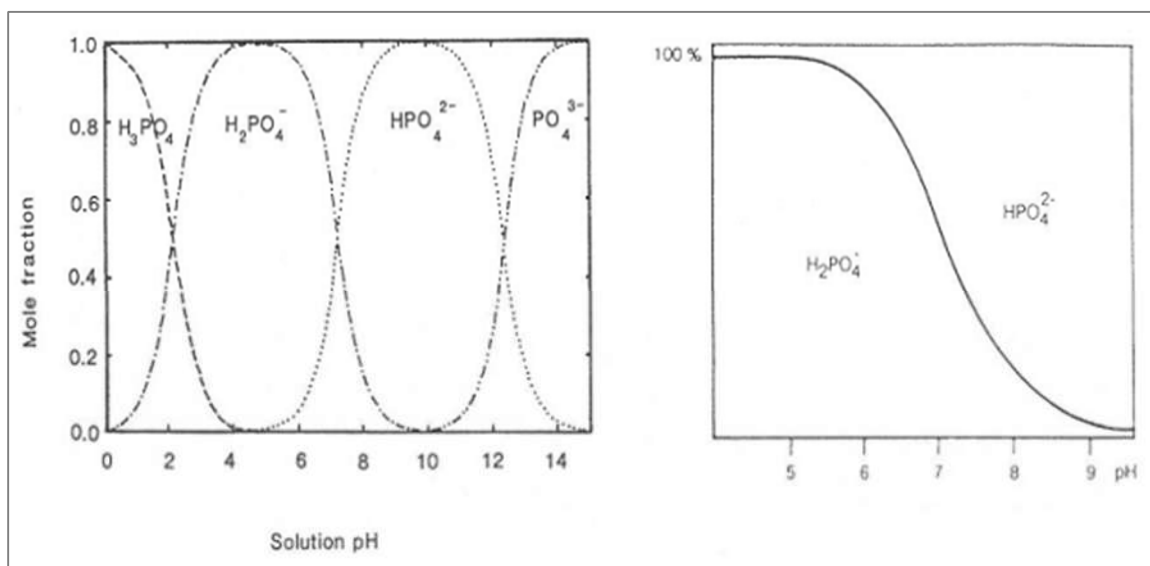


Figure I-3 : Impact du pH sur la distribution des formes solubles du phosphore (Drouet, 2010)

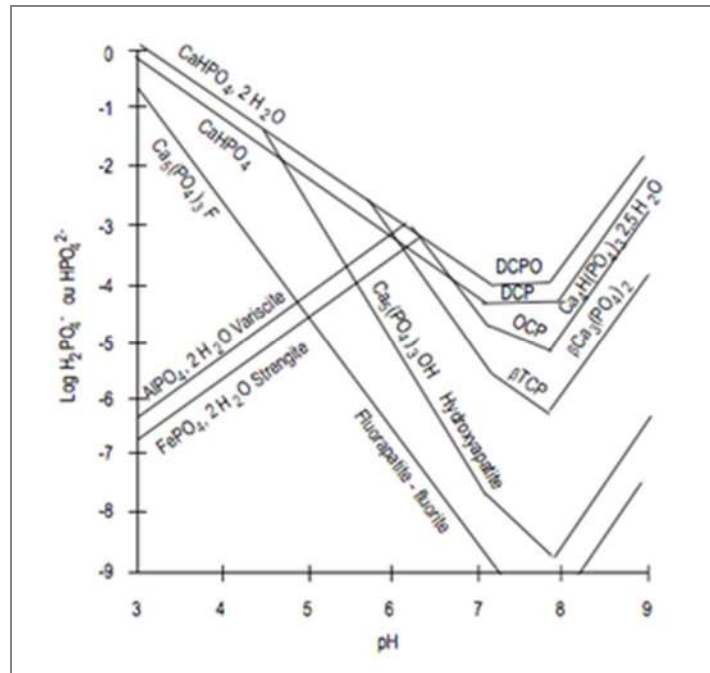


Figure I-4 : Diagramme de solubilité des minéraux phosphatés en fonction du pH (Lindsay et Moreno, 1960)

- **Matière organique**

La matière organique du sol ou l'humus joue un rôle important dans la disponibilité du phosphore pour les plantes cultivées. La matière organique est une source de phosphore, sa minéralisation donne le phosphate assimilable par la plante (Duthil, 1973). La décomposition de la matière organique donne des acides organiques qui dissolvent le phosphore minéral de fer et d'aluminium (Michel *et al.*, 2003).

Plusieurs auteurs ont noté une corrélation entre le C organique et la quantité de phosphore adsorbé par les sols (Woodruff et Kamprath, 1965 ; Ahenkorah, 1968). Selon Tisdale *et al.* (1985), la disponibilité du phosphore après la décomposition de résidus organiques est due à :

- Formation de complexes de phospho-humic qui sont plus facilement assimilables par les plantes ;
- Remplacement des anions du phosphate par les ions humate ;
- Revêtement des particules sesquioxyde par l'humus pour former un couvercle de protection et donc réduire la capacité de rétention de phosphate du sol.

La matière organique n'abaisse pas seulement l'adsorption de P, il fournit également une méthode d'accroître la disponibilité de P sans l'utilisation d'engrais. Il y a deux principaux mécanismes par lesquels la matière organique peut affecter la disponibilité du phosphore dans les sols :

- Etant négativement chargé la matière organique adsorbe ou complexes les cations tels

que Al et Fe dans les sols acides (Thamos, 1975 ; Bloom *et al.*, 1979) et Ca dans des sols calcaires (Barrow, 1973) et, par conséquent, réduit leurs activités et leur rôle dans la sorption de P ;

- Les anions organiques rivaliser avec les ions phosphate pour des sites d'adsorption sur les surfaces réactives. Ces réactions peuvent se manifester par une diminution de la capacité d'adsorption de P (Weir, 1972 ; Lindsay, 1979). Il a été suggéré que certains anions organiques forment des complexes stables avec le fer et l'aluminium, ce qui empêche leur réaction avec du phosphore en bloquant les sites d'adsorption (Leaver et Russell, 1957). Il a également indiqué que ces ions complexes libèrent phosphate précédemment retenu par le même mécanisme (Fig. I-5).

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

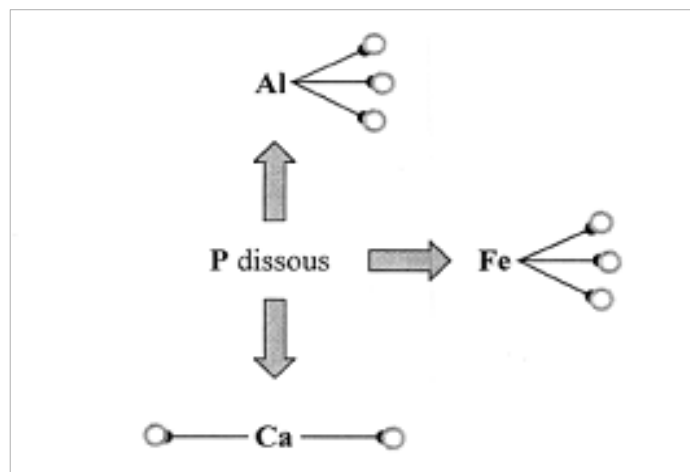


Figure I-5 : Mécanisme de compétition de la matière organique (cercles gris) avec le phosphate sur les sites de fixation d'Al, Fe et Ca (Parent, 2002).

- **Calcaire**

Lajtha et Bloomer (1988) considéré que le carbonate de calcium comme étant le principal agent géochimique capable de retenir de P dans les sols d'un écosystème désertique. L'application des engrais phosphatés dans les sols calcaires provoque généralement certains problèmes à savoir la fixation et l'accumulation des ions phosphates dans le sol. Pour connaître la dynamique de cet élément dans ces sols, il doit y avoir des connaissances sur les formes chimiques du phosphore et leurs interactions dans les sols calcaires (Halajnia *et al.*, 2009). Le calcaire dans le sol influe sur son pH qui influe à son

tour sur l'assimilation du phosphore. Dans les sols calcaires, riches en Ca^{2+} , la forme dominante du phosphore est celle du P-Ca (phosphate lié au calcium) (Mckenzie et al., 2003), caractérisée par une faible labilité (Gachon, 1988).

- **Éléments nutritifs et sels solubles**

Il est évident que les éléments nutritifs peuvent avoir un effet synergique ou antagoniste vis-à-vis des ions phosphoriques. Selon Clément (1990), les éléments nutritifs sont capables d'exercer les uns sur les autres des actions qui aboutissent soit à stimuler, soit à inhiber leur absorption par le végétal (Tableau I-2). D'après Gachon (1969), en milieu salin un apport phosphaté est susceptible d'augmenter le rendement ; cela est dû à une interaction positive entre le phosphore et les sels lorsque la concentration est modérée. Les anions organiques et inorganiques rivalisent avec les phosphates pour les sites d'adsorption. Les cations divalents améliorent sorption P plus de cations monovalents (White, 1981). Par exemple, argiles saturées avec le Ca^{2+} ont la capacité de retenir une plus grande quantité de phosphore que celles qui sont saturés de Na^+ ou autres cations monovalents. Plusieurs travaux ont montré la synergie existant entre les différents éléments nutritifs NPK. D'après Hafsi (1990), il existe des interactions synergétiques entre les deux engrais azotés et phosphatés qui font améliorer le rendement, la solubilité et l'absorption du phosphore. D'importantes corrélations ont été observées entre le phosphore total et certains éléments traces métalliques tels que Cu, Ni, Pb, Zn, Cd et Ti selon les types de sols considérés (Baize, 2000). La présence des sulfates en faible quantité dans le sol à un effet synergique vis-à-vis du phosphore. Aussi, il semble que le magnésium entraîne une meilleure dissolution du phosphore dans la solution du sol (Aissa et Mhiri, 2001).

Tableau I-2 : Relation entre les éléments nutritifs (Loué, 1987)

Zn	Cu	Mn	Na	Fe	Mg	Ca	K	P	
B		B		P		B			P
			A	S/B	A	A			K
B	B	B	A	A	A		A	B	Ca
			A			A	A	B	Mg
A	A	A				A	S/B	P	Fe
					A	A	A		Na
A				A		B		B	Mn
				A		B			Cu
		A		A		B		B	Zn

A : Antagonisme, **B** : Blocage ou inhibition, **P** : Précipitation mutuelle, **S** : Synergie ou interaction positive

d. Ligands organiques et ses fonctions dans la disponibilité du P

- Ligands organiques à faible poids moléculaire

Un ligand est un atome, un ion ou une molécule portant des fonctions chimiques lui permettant de se lier à un ou plusieurs atomes ou ions centraux. Les acides organiques de faible poids moléculaire (AOFPM) sont des composés de carbone caractérisés par la possession d'un ou plusieurs groupes carboxyle avec un poids moléculaire de 300 daltons (Strobel, 2001). Ils sont formés dans le sol à partir de la dégradation de la matière organique, métabolites microbiens et par les racines des plantes ou l'exsudation des champignons (Strobel, 2001). Les acides organiques les plus rencontrés dans le sol comprennent oxalate, acétate, citrate et le formate (Van Hees et *al.*, 2005). Les AOFPM sont communément trouvés dans le sol, où leur concentration dans la rhizosphère peut être plus élevée qu'un millimolaires (Huang et *al.*, 2003). Les acides organiques pouvant être classé comme des acides aromatiques ou aliphatiques carboxyliques (Strobel, 2001). Les acides aliphatiques peuvent être mono-, di-, ou tricarboxyliques comme formate, oxalate et le citrate, respectivement (Ryan et *al.*, 2001). Tandis que, les acides aromatiques peuvent être mono - ou des dicarboxyliques tels que l'acide salicylique et phtalique, respectivement (Fig. I-6). Les AOFPM servent plusieurs fonctions utiles dans le sol tel que Par exemple, en raison de leurs propriétés acides et chélation, les acides organiques augmentent la solubilité du P dans le sol, en augmentant la solubilité des composés contenant P et en diminuant la précipitation des ions phosphriques. La dissolution des composés de phosphate est améliorée en fournissant les protons et complexant calcium (Ca^{2+}) par les ions d'AOFPM (Ryan et *al.*, 2001). Les AOFPM sont également des sources d'énergie pour les micro-organismes et important en cycle du carbone. Ils peuvent former des complexes avec des métaux ou composés de coordination. Le degré de complexation dépend de la nature de l'acide organique (nombre de groupements carboxyliques), pH de la solution du sol et du type de métal et de sa concentration (Jones, 1998). Le nombre de groupements carboxyliques et leur position détermine la stabilité du ligand : complexes métalliques (Ryan et *al.*, 2001). Les Lactate, formate et acétate ont seulement un groupe carboxyle (monocarboxylates) qui leur donnent une faible capacité de complexation. Tandis que, les malate, oxalate et malonate ont deux groupes carboxyle et par conséquent chélater les cations plus fortement que monocarboxylates. Les tricarboxylates comme le citrate ont une affinité élevée pour les métaux trivalents tels que Fe^{3+} et Al^{3+} (Ryan et *al.*,

2001).

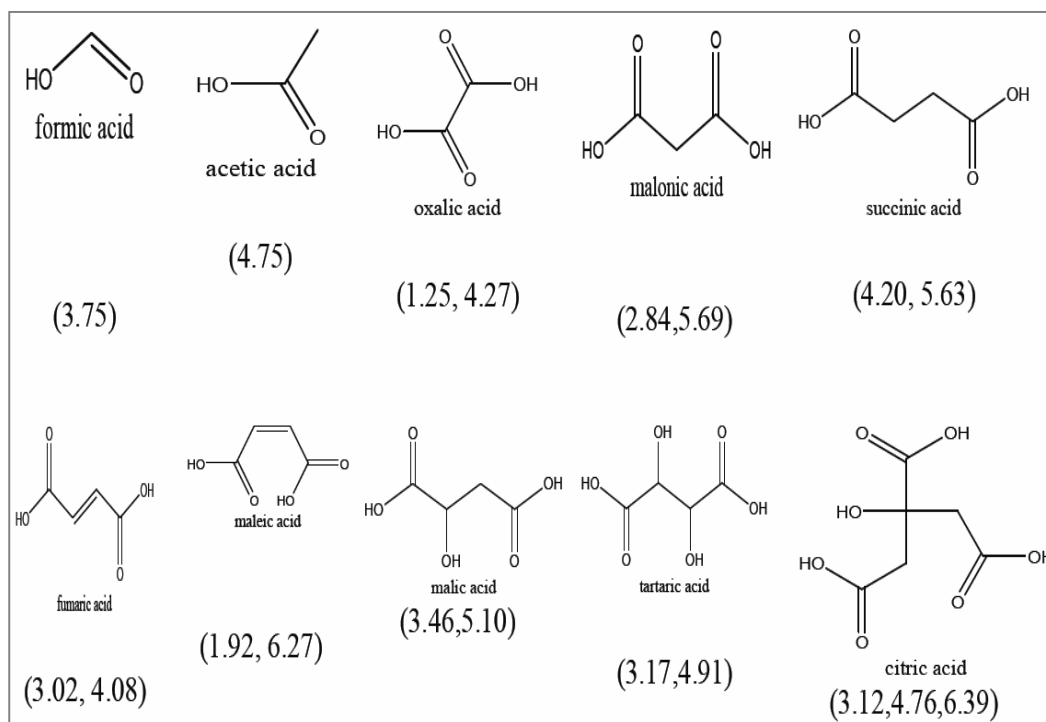


Figure I-6 : Les structures et les constants de dissociation de certains AOFPM dans des sols

- **Acides organiques de faible poids moléculaire**

Les racines des plantes et les microorganismes libèrent une grande variété de composés organiques dans le sol, notamment des acides organiques de faible poids moléculaire (AOFPM). Les exsudats racinaires comprennent une grande variété de composés qui peut s'écouler non plus passivement de cellules épidermiques en réponse à des gradients de concentration (diffusât, par exemple, sucres, bioacides, acides aminés, l'eau, des ions inorganiques, oxygène), être excrété activement pour faciliter le métabolisme interne (excrétions, p. ex., dioxyde de carbone, ions bicarbonates, protons, électrons, l'éthylène), ou être sécrétée activement pour faciliter les processus externes (sécrétions, par exemple, mucilage, protons, électrons, enzymes, sidérophores, composés allélopathiques) (Uren et Reisenauer, 1988 ; Marschner, 1995). Les AOFPM sont des constituants importants dissous de la solution du sol et les eaux naturelles, mais ont été peu caractérisées et sont fréquemment regroupée avec les acides humiques et fulviques dans le pool du carbone organique dissous (COD). Cependant, ils sont nettement différents par rapport à ceux avec une masse moléculaire élevée (composés aromatiques, composés à longue chaîne carbonée) en termes de fréquence, la distribution et réactivité (Wolt, 1994). L'AOFPM regroupe les acides aliphatiques volatils et non volatils et, plus

rarement, des acides aromatiques. Certains acides ont un ou plusieurs isomères chimiques avec position différente des groupes carboxyle ou hydroxyle dans la structure. La plupart des AOFPM communs dans le système sol sont ceux qui participent dans le cycle des acides tricarboxyliques (Cycle de Krebs) dans les organismes, y compris l'acide citrique ($C_6H_8O_7$; *2-hydroxypropane-1,2,3 - acide tricarboxylique*), isocitrique ($C_6H_8O_7$; *1-hydroxypropane-1,2,3-tricarboxylique*), aconitique ($C_6H_6O_6$; *1-propène-1,2,3-tricarboxylique*), α -cétoglutarique ($C_5H_6O_5$; *2- acide Oxopentanedioïque*), succinique ($C_4H_6O_4$; *acide butanedioïque*), fumarique ($C_4H_4O_4$; *TRANS- l'acide butènedioïque*), L-malique ($C_4H_6O_5$; *L'acide L-hydroxybutanedioïque*) et oxaloacétique ($C_4H_4O_5$, *acide oxobutanedioïque*) (Van Hees et *al.*, 2005). D'autres acides aliphatiques sont les membres inférieurs de la série d'acides grasses : acide formique (CH_2O_2 ; *méthanoïque acide*), acétique ($C_2H_4O_2$; *éthanoïque acide*), propénoïque ($C_3H_6O_2$; *acide propénoïque*) et butyrique ($C_4H_8O_2$; *acide butanoïque*). Egalement des acides aliphatiques existent avec une large distribution sont : l'acide oxalique ($C_2H_2O_4$; *acide éthanedioïque*), lactique ($C_3H_6O_3$; *acide 2-hydroxypropanoïc*) et L-tartarique ($C_4H_6O_6$; *acide L-2,3-dihydroxybutanedioïc*) (Wolt, 1994). Plus récemment, d'autres acides aliphatiques comme l'acide malonique ($C_3H_4O_4$; *acide propanedioïque*) et maleïque ($C_4H_4O_4$; *l'acide cis-butenedioïque*), un isomère d'acide fumarique, a été identifié dans l'exsudat d'une certaine espèce des plantes (Cieslinski et *al.*, 1998). En effet, les AOFPM les plus connus sont l'acide citrique, L-malique et l'acide oxalique, fréquemment trouvés dans beaucoup d'espèces végétales avec des hautes concentrations, selon leur abondance, ces acides sont parmi les AOFPM les plus étudiés dans les sols (Jones, 1998).

- **Effet des AOFPM sur la disponibilité du phosphore dans le sol**

Le taux de dissolution de phosphate peut être grandement accéléré dans le sol en présence des acides organiques tels que le malate, citrate et oxalate favorisant un enrichissement très élevé de la solution du sol en P (de 10 à 1000 fois) en fonction du type de sol et la concentration d'acide organique (Fox et *al.*, 1990). D'une façon générale, l'efficacité de l'extraction de P inorganique par les acides organiques semble suivre l'ordre suivant : citrate > oxalate > malate > acétate (Lan et *al.*, 1995). Cependant, cette efficacité dépend de nombreux facteurs, notamment le pH et la minéralogie du sol (Lan et *al.*, 1995). L'effet d'AOFPM qui se trouve dans le sol sur la libération du phosphore inorganique a été étudié par Harrold et Tabatabai (2006). Les chercheurs ont essayé

d'étudier les effets d'une variété d'AOFPM et trois acides minéraux, en général, les tri - et di- acides carboxyliques sont plus efficaces en libérant P de sol en Amérique. Wang et *al.* (2007) a mené une recherche afin d'évaluer les capacités et les mécanismes de trois acides organiques dont l'acide citrique, tartrique et acides oxalique dans la mobilisation des phosphates d'un loam argileux Ultisol qui avait reçu des différents engrais à long terme. Les résultats ont montré que le P disponible (P-Olsen) a augmenté considérablement par le traitement des acides et le phosphate de Fe, et le phosphate de Ca ont été mobilisés à des degrés divers. L'ordre des acides organiques pour la mobilisation de P était : citrique > tartriques > oxalique acides. Les effets des acides phénoliques sur la mobilisation des P ont été étudiés et les résultats ont montré que les acides phénoliques peuvent mobiliser le P de forme NaHCO_3 insoluble dans les sols calcaires (Hu et *al.*, 2005).

I.2. Sols calcaires

I.2.1. Calcaire

Le calcaire est une roche constituée par du carbonate de calcium anhydre cristallisé sous forme de calcite à symétrie rhomboédrique, qui est le constituant le plus abondant des roches sédimentaires principalement organogène qui peut être d'origine détritique ou chimique dans la lithosphère (Vatan, 1967 ; De Os Horta, 1979 ; Lozet et Mathieu, 2002 ; Ramade, 2008). Le calcaire est peu soluble, surtout dans l'eau chargée de gaz carbonique, généralement bien stratifié où compacte, la couleur est variable mais souvent blanchâtre, grise ou sombre. Il peut contenir du $MgCO_3$ (Lozet et Mathieu, 2002). Les sols calcaires couvrent plus de 30 % de la terre, leurs teneurs en $CaCO_3$ peuvent atteindre jusqu'à 95 % (Merschner, 1995). Ces types de sol sont très fréquents dans les régions méditerranéennes et désertiques. Notamment en Algérie, où on les rencontre aussi bien dans les régions semi-aride et arides (Halitim, 1988) ; leur origine est due principalement à deux facteurs :

- Les roches : qui sont très fréquemment carbonatées et dolomitiques ou simplement riches en calcium.
- Les climats : souvent très arides, ainsi les régimes pluviométriques sont peu favorables à un entraînement profond (lessivage) du calcaire hors des sols.

La plupart des sols calcaires sont regroupés selon la classification CPCS (1967) parmi les sols peu évolués, calcimagnésiques, isohumiques et les sols fersiallitiques à réserves calciques (Ruellan, 1976).

En Algérie, les sols calcaires ont fait l'objet de nombreuses études ponctuelles ou de synthèse. Il ressort que les sols contenant du calcaire dans un ou plusieurs de leurs horizons, sauf exception, se distribuent sur l'ensemble du nord de l'Algérie. Ils peuvent être, dans beaucoup de cas, des sols à profils calcaires différenciés, particulièrement dans les étages bioclimatiques arides et semi-arides. Ainsi, le calcaire peut-il se trouver dans le sol sous trois formes principales : en concentration diffuse, en concentrations discontinues (pseudo-mycélium, amas friables, nodules) ou en concentrations continues (encroûtements, croûtes, dalles, pellicules rubanées) en fonction des facteurs du milieu (climat, roche, âge de la formation géomorphologique, topographie) et des conditions de genèse (Djili, 2000).

I.2.2. Définition d'un sol calcaire

Un sol calcaire peut être défini comme étant un sol contenant du $CaCO_3$ libre en

quantité suffisante, existant en carbonate de calcium ou de magnésium (Loepert et Suarez, 1996 ; Hopkins et Ellsworth, 2005).

Tableau I-3 : Niveaux d'effervescences du sol par réaction HCl et de teneurs en CaCO₃

Réaction	Classe d'effervescence [†]	Equivalence en CaCO ₃ (%)	Classe du sol ^{**}
Sans réaction	Aucune	<5	Faiblement calcaire
Quelques bulles	Très faible	5-15	Modérément calcaire
Bulles aisément observés	Faible	15-25	Fortement calcaire
Bulles de la faible mousse	Modérée	25-40	Très fortement calcaire
Bulles de la mousse épaisse	Forte	>40	Extrêmement calcaire

[†] (Day, 1983 ; Luttmerding et *al.*, 1990) ; ^{**} (Day, 1983)

Selon (Lozet et Mathieu, 2002 ; Legros, 2007) les sols calcaires se détectent facilement par un test à l'acide chlorhydrique. Une goutte d'acide posée sur l'échantillon provoque un dégagement de CO₂ visible dans le liquide et d'autant plus violent qu'il y a beaucoup de calcaire. la réaction est la suivante :



Les sols calcaires contenant du calcaire actif c'est-à-dire du carbonate de calcium à l'état de particules si fines que leur solubilisation continue par les acides de sol entretient dans la solution une concentration importante d'ions Ca²⁺. Le complexe adsorbant de ces sols est en général bien pourvu, si non saturé en calcium (Lozet et Mathieu, 2002 ; Soltner, 2005a).

I.2.3. Origine du calcaire dans le sol

Le calcaire semble apparaître dans le sol suite à une altération de la roche mère sous-jacente qui au contact des solutions percolantes saturée en gaz carbonique dissous en HCO₃⁻ et de l'acide nitrique provenant de la nitrification de la matière organique va libérer du Ca²⁺. La dissolution des carbonates et le transfert du calcium peut être suivi d'une précipitation de la calcite si la concentration en HCO₃⁻ et en NO₃⁻ de l'eau dans le profil diminue ou à une précipitation lors de l'arrêt du drainage durant la période sèche. La fragmentation des roches calcaires va libérer progressivement différentes fractions, pierres, cailloux, graviers et sable grossier. Cela est régi par les propriétés physiques de la roche principalement la porosité et la dureté (Duthil, 1973).

I.2.4. Classification des sols calcaires

La classification et la dénomination des sols calcaires sont très variées.

- Dans le cadre de la classification française (CPCS, 1967), ils sont pour la plupart regroupés parmi les sols peu évolués, les sols calcimagnésiques, les sols isohumiques, les sols fersialitiques à réserve calcique.
- Dans le cadre de la classification américaine (USDA, 1967) ce sont selon les cas, des inceptisols (xerochrepts). Des aridisols (argids et orthides) des mollisols (Rendolls et Xérolls) des alfisols (Xérolfs).
- Dans le cadre de la légende de la carte mondiale des sols (Dudal, 1968 in Ruellan, 1976) ce sont selon les cas : des fluvisols, des Rendzinas, des yermosols, des xérols, des castanozems, des cambisols (Ruellan, 1976).

I.2.5. Caractéristiques des sols calcaires

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

D'après Ruellan (1984), au sein des sols calcaires, on peut distinguer, sur la base d'une réflexion génétique, deux types majeurs d'horizons :

- Des horizons d'altération et de départ du calcaire : le comportement essentiel du calcaire, résultat de l'action de plusieurs mécanismes, y est d'abord la dissolution, puis son transfert vers la profondeur du sol ou vers l'aval de la toposéquence pédologique ; ces horizons peuvent être en surface ou en profondeur.
- Des horizons d'accumulation de calcaire : le comportement essentiel du calcaire y est d'abord à son arrivée, en provenance des horizons situés au-dessus d'eux ou de l'amont de la toposéquence pédologique, ou encore de la nappe phréatique sous-jacente ; puis vient sa précipitation donnant naissance à des volumes très 'riches en' calcaire qui sont discontinus ou continus ; ces horizons, quand ils sont fonctionnels dans le sens de l'accumulation, sont toujours en profondeur.

I.3. Problématique de l'adsorption du phosphore des sols calcaires

I.3.1. Etat du phosphore dans les sols calcaires

Plusieurs chercheurs ont étudié le problème du phosphore dans les sols calcaires, et ont montré que les solutions diluées de phosphate ne précipitent pas dans ce milieu, cependant elles donnent lieu à une fixation très rapide à la surface des grains de CaCO_3 , cette fixation augmente avec la finesse de grain (Demolon, 1968). Le pouvoir fixateur (adsorption) et l'insolubilisation sont considérés comme deux facteurs très importants de l'efficacité des engrais phosphatés en milieu calcaire (Duthil, 1976). Selon ce même auteur la fourniture d'ions PO_4 dans un milieu calcaire est assurée par l'apport d'engrais et la minéralisation de la matière organique d'origine végétale ou animale, les ions libérés dans le milieu se répartissent de la manière suivante :

- Une partie reste à l'état dissoute dans la solution du sol.
- Une partie se fixe sur les divers sites d'adsorption affectés par le milieu (calcaire, argile, matière organique).
- Et enfin une partie s'engage dans des réactions avec le calcium et le magnésium. Ces derniers se trouvent dans des proportions élevées à l'état libre et combiné en contribuant à l'élévation du pH, entraînant la précipitation de l'ion phosphorique.

Il y a donc deux principaux mécanismes : l'adsorption et l'insolubilisation du phosphate.

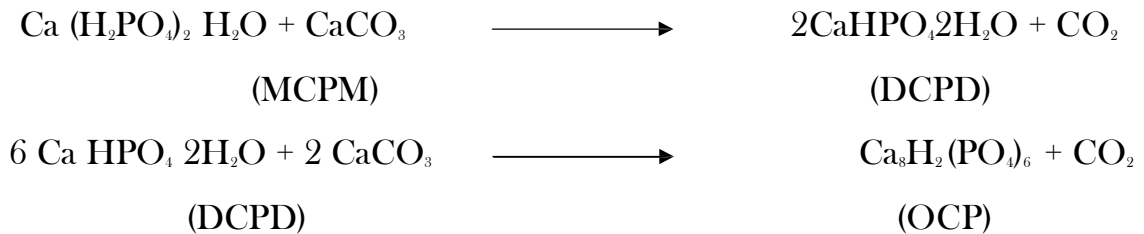
a. Adsorption

L'adsorption est fonction du pouvoir fixateur du sol. En sol calcaire ce pouvoir fixateur peut varier de 100 à 600 mg kg^{-1} pour porter la solution du sol au standard de 2 mg L^{-1} (Duthil, 1976). L'adsorption des ions (PO_4^{3-}) sur le calcaire est une réaction chimique de surface conduisant à la formation de germes superficiels des phosphates calciques (Arvieu, 1980). Ces derniers évoluent progressivement en hydroxylapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) ou en phosphate octocalcique ($\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) (Morel, 1996). Selon Soltner (1986), le calcaire peut également fixer les anions PO_4^{3-} sous forme assez facilement échangeable ou "auto diffusible" à condition que le pH ne soit pas trop élevé et que le sol soit riche en humus, et peut dans ce cas contribuer à la nutrition de la plante.

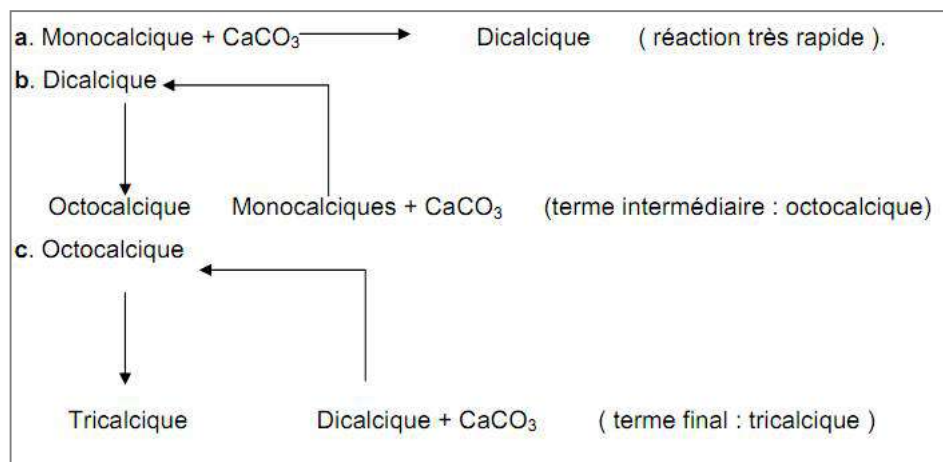
b. Insolubilisation du phosphate

La séquence d'insolubilisation du phosphore est bien connue depuis les travaux d'Arvieu (1972), ainsi que dans ses travaux ultérieurs (1974, 1980). Dans les sols non calcaires, les phosphates monocalciques peuvent demeurer sous cette forme en sols

neutres ou légèrement acides, mais se transforment en phosphates de Fer et d'Aluminium dès que l'acidité augmente (Morel, 1996). Dans les sols calcaires, une première réaction transforme le phosphate monocalcique en phosphate dicalcique dihydraté (Arvieu, 1972). Le dicalcique n'est pas stable et évolue vers des formes plus riches en calcium et de moindre solubilité. Il se forme en particulier un phosphate intermédiaire : l'octocalcique selon les réactions :



Ces deux étapes se produisent d'autant plus tôt et avec une vitesse d'autant plus grande que la température ou la quantité de CaCO_3 mise en expérience est plus élevée (Arvieu, 1974). On peut admettre que le phosphate monocalcique réagit rapidement avec le calcaire en donnant un mélange de dicalcique, tricalcique et hydroxyapatite en proportion variable et suivant les schémas suivants :



La réaction (a) est une réaction très rapide, les réactions b et c sont lentes et retardées par l'abaissement de la température. La réaction de CaCO_3 sur le phosphate dicalcique dihydraté implique en effet l'hydrolyse de celui-ci, et aussi le phosphate octocalcique s'hydrolyse lentement à son tour avec dissolution du phosphore et formation d'apatite plus basique. En menant une expérience sur le vieillissement du phosphore dans des sols calcaires, Gachon (1973) a trouvé que les phosphates solubles introduits dans ces sols se trouvent en majeure partie plus ou moins rapidement engagés dans des composés phosphocalciques de moins en moins solubles. Selon Dutil (1976), l'insolubilisation moyenne du phosphore en sol calcaire est de l'ordre de 30% des

apports. Enfin certains facteurs peuvent influencer la précipitation du phosphore en milieu calcaire :

- Réactivité du calcaire : la réactivité chimique du carbonate dépend de la finesse de cristallisation, les particules fines possèdent un pouvoir d'adsorption plus élevé que les grossières (Dibbe, 1973).
- Présence d'ions Mg : Arvieu et Bouvier (1974) ont confirmé après leur étude concernant l'action des ions Mg^{2+} sur l'hydrolyse du phosphate dicalcique dihydraté et qui l'a suivi par mesure du pH du milieu réactionnel que les ions Mg^{+2} modifient le processus d'hydrolyse du phosphate dicalcique dihydraté (DCPD). Soit en retardant ou inhibant cette réaction, Soit en modifiant son déroulement et provoquant l'apparition des composés nouveaux : phosphate trimagnésien.
- Température et l'humidité : Une température élevée favorise la précipitation du phosphore et une humidité importante permet une mobilité plus grande des ions phosphatés.
- Substances humiques : la présence de faibles quantités d'acides humiques en solution empêche la transformation de phosphate dicalcique (DCPD) en phosphate octocalcique (OCP) donc, l'humus inhibe la précipitation des apatites (Schaefer et Stejskal, 1976). Si l'excès de Ca^{2+} conduit à l'insolubilisation du phosphore, l'humus agit comme un antidote.

c. Précipitation des phosphates de calcium

Parmi les différentes formes solides de phosphates de calcium (Tableau I-4), les apatites sont les plus stables. Plusieurs substitutions isomorphiques sont possibles dont les formes les plus connues sont l'hydroxyapatite (HAP) $(Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2)$ et la fluoroapatite (FAP) $(Ca_{10}(PO_4)_6F)$. La phase initiale formée lors de la précipitation de phosphates de calcium dépend des caractéristiques de la solution. Zoltek (1974) rappelle que les formes trouvées dans différentes études diffèrent énormément. La théorie d'Ostwald-Gay Lussac, généralement admise, établit que la forme thermodynamique la moins stable, et donc la plus soluble est souvent la plus facilement précipitable. Dans ces conditions, l'ordre de formation de précipités de phosphates de calcium sera : phosphate dicalcique, phosphate tricalcique, phosphate octocalcique puis les apatites si des impuretés ne perturbent pas le système. La précipitation de phosphates de calcium dépend fortement des conditions

physicochimiques de la solution. Les pH basiques favorisent cette précipitation comme le montre la figure I-7 pour une concentration en Ca de 1.10^{-3} M (Stumm et *al.*, 1996). Plusieurs caractéristiques de la précipitation homogène de phosphates de calcium ont été montrées dans des travaux de Song et *al.* (2001, 2002). On le comprend par le calcul de l'indice de saturation vis-à-vis de l'HAP, le pH, la concentration en calcium et en phosphore de la solution initiale sont des facteurs contrôlant la précipitation. En résumé, le pouvoir fixateur (adsorption) et l'insolubilisation doivent être considérés comme étant des facteurs très sérieux de l'efficacité des engrais phosphatés dans ces milieux calcaires.

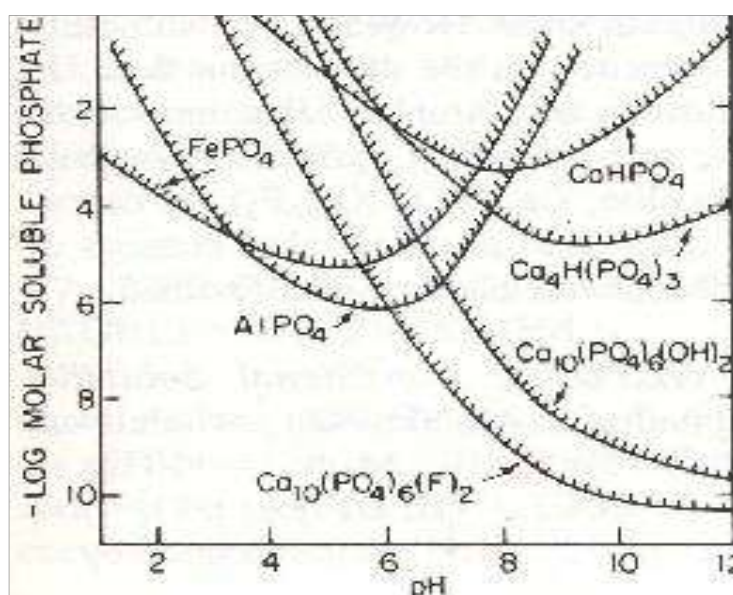


Figure I-7 : Diagramme de solubilité des phosphates de Ca, Fe et Al (Stumm et *al.*, 1996)

Tableau I-4 : Différents composés de phosphates de calcium (Stumm et *al.*, 1996)

Composés	Formule chimique	Rapport [Ca/P]
Hydroxyapatite (HAP)	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$	1,67
Fluoroapatite (FAP)	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}$	1,67
Phosphate octocalcique (OCP)	$\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6$	1,33
Phosphate tricalcique (TCP)	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	1,5
Phosphate dicalcique (DCP)	CaHPO_4	1
Phosphate monocalcique (MCP)	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	0,5

I.3.2. Modélisation de l'adsorption du phosphore dans le sol

La description quantitative de l'interaction particules de sol-anions orthophosphate est particulièrement intéressante car elle peut permettre d'estimer les besoins du sol en matière de fertilisation phosphorique (Ozanne et Shaw, 1967), les quantités de phosphore

pour un développement optimum de plantes (Fox et Kamprath, 1970) et l'efficacité d'un amendement (Barrow 1978). Les équations de Freundlich, Langmuir, et Tempkin sont souvent utilisées pour décrire les relations Quantité-Intensité entre les phases solide et liquide du sol (Sanyal et De Datta, 1991).

a. Principe

Les isothermes de sorption sont les représentations mathématiques de la relation entre la concentration du phosphore qui est absorbé par des particules de sol et la quantité restante en solution après qu'une quantité connue de phosphore été ajoutée (Rayment et Lyons, 2011). L'isotherme d'adsorption est construite sur la base d'une large gamme d'apport de P et pour un temps de contact sol : solution de 24 heures ou plus.

b. Mode opératoire

Extraction par une solution électrolytique : CaCl_2 0,01 M contenant des doses croissantes de phosphore sous forme KH_2PO_4 , dans un rapport sol : solution de 1 :10. Pour notre cas, le rapport sol : solution est (4 g de sol : 40 ml de CaCl_2). Agitation intermittente pendant 24 heures puis séparation sol : solution par centrifugation et filtration. Le volume de solution retenue par l'échantillon (entraîneur) est déterminé par une double pesée avant et après filtration ; il permet de déterminer la quantité de phosphore restant sur le sol après filtration (entraîneur), la quantité de phosphore adsorbée par l'échantillon de sol est calculé par différence entre la concentration initiale (dose apportée) et celle retrouvée en solution. Les principales motivations pour décrire les isothermes d'adsorption sont d'une part la volonté de disposer d'un nombre limité de paramètres permettant de décrire les caractéristiques d'adsorption d'un sol, sans qu'il soit nécessaire de se référer à une courbe (Barrow, 1978) et d'autre part, de comprendre la nature des phénomènes d'adsorption. Les données d'adsorption du P (X et C) ont été ajustées aux deux équations de Freundlich et Langmuir dont on peut rappeler ici respectivement et de façon succincte les expressions :

- **Formalisme de Langmuir**

Le modèle de Langmuir a l'avantage par rapport aux modèles de Freundlich et de Tempkin dans des applications environnementales parce que la capacité maximum du sol d'absorber le phosphore (c.-à-d. la sorption maximale de P, X_{max}) et la constante d'énergie de liaison de P (k) peut être déterminée (Graetz et Nair, 2000 ; Villapando et Graetz, 2001). Ces deux paramètres ont été employés pour évaluer le potentiel de perte du P : le

degré de saturation du P (X/X_{max}) et l'index de pouvoir tampon maximum du P (Zhang et al., 2005 ; Bolster et Hornberger, 2007). L'équation de Langmuir sous sa forme linéaire s'écrit de la façon suivante (Holford et al., 1974) :

$$\frac{C}{X} = \frac{C}{X_{max}} + \frac{1}{K \times X_{max}}$$

Où :

C : est la concentration à l'équilibre (mg P L^{-1}) ; X : est la quantité de P adsorbée (mg P kg^{-1}) ; X_{max} : le maximum d'adsorption (μg de phosphore g^{-1} sol) et K est une constante empirique indiquant l'énergie d'adsorption ($\text{ml } \mu\text{g}^{-1}$ de phosphore).

Les différentes constantes sont obtenues par le calcul de la pente ($1/X_{max}$) et de l'ordonnée à l'origine ($1/kb$) dans la représentation C/X en fonction de C (Fig. I-8).

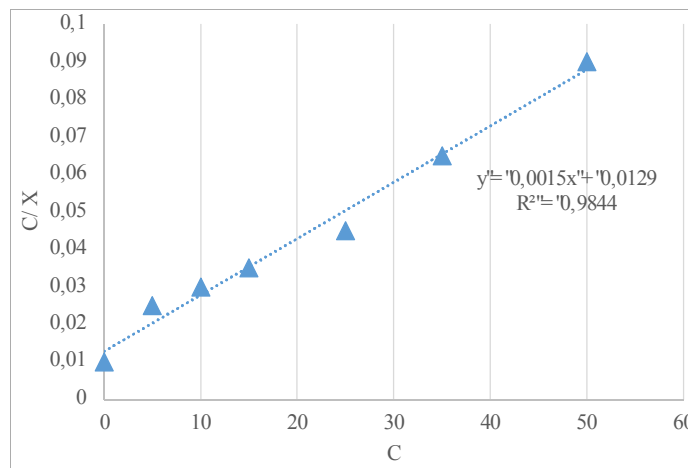


Figure I-8 : Exemple d'une équation adaptée de Langmuir à partir des données de la sorption de P

- **Formalisme de Freundlich**

Le formalisme de Freundlich est de loin le plus utilisé du fait de sa simplicité et de sa bonne adéquation aux données, mais également le plus ancien. L'équation a été utilisée pour la première fois pour le phosphore en 1916 par Russell et Prescott. C'est un modèle empirique dont les constantes n'ont aucune correspondance physique (Holford et al., 1974 ; Olsen et Watanabe, 1957), bien qu'il soit possible de relier l'exposant de l'équation de Freundlich à différentes caractéristiques physico-chimiques du sol (Fitter et Sutton, 1975). Le modèle a été amélioré par adjonction d'un terme permettant de tenir compte du phosphore initialement adsorbé sur les particules de sol, sans qu'il soit fait appel à la technique du phosphore isotopique (Yuan et Lavkulich, 1994). L'utilisation de l'équation de Freundlich pour déterminer les caractéristiques d'adsorption d'un sol possède de nombreux avantages par rapport aux autres modèles (Mead, 1981).

L'équation de Freundlich sous sa forme linéaire s'écrit de la façon suivante :

$$\log X = \log a + n \log C \quad \text{Où :}$$

X : est la quantité de P retenue par gramme de sol ($\mu\text{g } P \text{ g}^{-1} \text{ sol}$). C est la concentration en P ($\text{mg } L^{-1}$) de la solution d'équilibre ; a et n : sont des constantes empiriques exprimées en $\mu\text{g g}^{-1}$ et g^{-1}mL respectivement qu'on obtient normalement par régression linéaire simple. Dans nos recherches, les paramètres (a) et (n) ont été estimés par la régression de la forme logarithmique des données obtenues de l'isotherme de sorption (Fig. I-9).

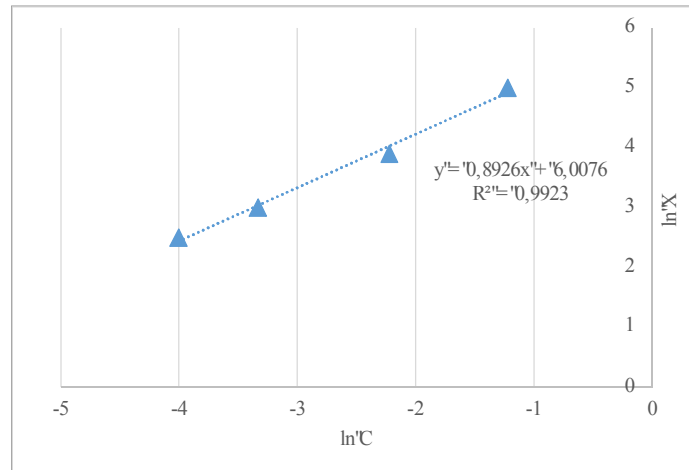


Figure I-9 : Exemple d'une équation adaptée de Freundlich à partir des données de la sorption de P

I.4. Importance du phosphore dans la vie des céréales

Dans beaucoup de systèmes agricoles, le phosphore est un aliment minéral le plus limitant pour les plantes (Ramaekers et *al.*, 2010). Le phosphore est un macroélément essentiel qui joue un rôle capital dans le transfert d'énergie, le règlement métabolique, et l'activation de protéines (Priya et Sahi, 2009). Il se trouve dans la plante sous la forme de phospho-esters, comprenant les glucides phosphorylés qui jouent un rôle extrêmement important dans la photosynthèse et le métabolisme intermédiaire (Hopkins, 2003). Son rôle rentre dans tous les processus de croissance et sa répartition dans les tissus est très inégale et augmente généralement avec la teneur en azote (Gervy, 1970). Lambert (1979), ajoute que le phosphore est considéré également comme un constituant essentiel des chromosomes, il intervient partout où il y a la multiplication cellulaire d'où l'importance du phosphore dans les phénomènes de croissance et de reproduction. Il joue également un rôle déterminant dans le transfert d'énergie, il est indispensable à la photosynthèse et aux processus chimico-physiologiques de la plante. Au-delà de son rôle dans des processus de transfert, le phosphate est un composant structural des phospholipides, acides nucléiques, nucléotides, coenzymes, et phosphoprotéines (Barker et Pilbeam, 2007). Bennai et Benabbas (2007), ont résumé les principaux rôles du phosphore surtout pour les céréales comme suit :

- Le phosphore est un élément nécessaire à la croissance du blé, il agit sur le développement des racines en activant son démarrage, c'est également un facteur de précocité et de fructification.
- C'est un élément qui accroît la résistance au froid et aux maladies.
- À la levée, le phosphore est nécessaire pour une bonne installation et démarrage de la culture et les besoins sont très élevés au stade épiaison.
- Il est peu mobile, pour cela il est souhaitable de l'apporter en localisé et sous forme soluble pour stimuler le développement racinaire au moment de la germination.

I.4.1. Rythmes d'absorption du phosphore par la plante

Le phosphore est absorbé par les racines principalement sous forme d'orthophosphate $H_2PO_4^-$ et très peu sous forme de HPO_4^{2-} . Ce prélèvement est un processus actif qui est facilité par le co-transporteur H^+ (Mengel et Kirby, 2001). Une fois absorbé par les plantes, le phosphore est rapidement impliqué dans le processus

métabolique. Après une période d'au moins 10 minutes après le prélèvement, 80 % du phosphore absorbé était incorporé dans les composants organiques. Mais juste après il est transformé sous forme de P inorganique dans le xylème (Marschner, 1998). Les plantes en croissance stockent peu d'ions phosphatés simples, à la différence des graines. Ce stockage assure un bon démarrage de la croissance et le développement des graines en germination avant l'installation du système racinaire. Dans les graines, le phosphore est principalement stocké sous forme de polyphosphates tels que les phytates. Ces phytates constituent environ 50 % du phosphore total contenu dans les graines des légumineuses et à peu près 60 à 70 % dans les graines de céréale. Les prélèvements du phosphore par les végétaux, lors de leurs premiers stades de développement, sont extrêmement réduits. C'est ainsi qu'un blé d'hiver, du semis jusqu'à la fin du tallage, ne puise que tout au plus 1 g de P m² dont 1/10 était déjà contenu dans le grain semé. Puis la marche des prélèvements s'accélère rapidement et passe au rythme de 400 g ha⁻¹ jour⁻¹ de P soit près de 1 Kg P₂O₅ ha⁻¹ jour⁻¹ pendant les périodes de montaison et d'épiaison (Gervy, 1970). L'absorption des éléments nutritifs par les cultures varie selon le stade végétatif. Les céréales à croissance rapide absorbent l'azote et le potassium au rythme journalier de 5 Kg ha⁻¹ et le phosphore en quantité dix fois plus faibles (Buckman, 1990).

I.4.2. Teneur des plantes en phosphore

Le phosphore joue un rôle essentiel dans le développement et la croissance des végétaux dont la teneur moyenne en P₂O₅ (tableau I-5) est de l'ordre de 0,5 à 1 % de la matière sèche (Gros, 1979 ; Falisse et Lambert, 1994). Il se trouve dans la plante surtout sous la forme de phosphoesters, comprenant les glucides phosphorylés qui ont une importance majeure dans la photosynthèse et le métabolisme intermédiaire (Hopkins, 2003).

Tableau I-5 : Teneur en P dans les organes du blé (Dutil, 1973)

P en % MS	Organes
0,70-1,1	Grain
0,15-0,25	Paille

I.4.3. Exigences nutritionnelles en phosphore des plantes

Evers (2002), suggère que les prélèvements du phosphore sont directement liés à la croissance de la plante. D'après Soltner (2005b), le blé dur est classé parmi les plantes moyennement exigeante en phosphore. Les exportations en éléments minéraux (N, P₂O₅

et K_2O) de blé sont mentionnées dans le tableau.

Tableau I-6 : Exportation de blé en (N, P_2O_5 et K_2O) (Prevost, 1999)

N (kg q ⁻¹)	P_2O_5 (kg q ⁻¹)	K_2O (kg q ⁻¹)	Organes
1,9	0,95	0,5	Grain
0,6	0,25	1,2	Paille

I.4.4. Facteurs influençant les prélèvements du phosphore par les céréales

Selon Kamprath et Watson (1980), les facteurs affectant la fourniture de P aux plantes sont la quantité de P du sol (quantité), la concentration de la solution de sol en P (intensité), et le mouvement de P vers racines (diffusion). Dans l'évaluation du phosphore disponible dans le sol par des analyses chimiques, on doit examiner la relation entre la quantité, l'intensité, et diffusion, et les facteurs influant sur la disponibilité du P pour les plantes.

a. Pouvoir tampon du sol

La quantité de P à l'équilibre entre la phase solide et la phase liquide se caractérise par le pouvoir tampon d'un sol. C'est la capacité d'un sol de maintenir sa concentration de P en solution comme immobilisée par le sol par le biais des divers processus ou le phosphore est ajouté par la fertilisation. Ainsi, la disponibilité du phosphate du sol est décrite par des paramètres intensifs et extensifs qui sont déterminés par la concentration de phosphore dans la solution du sol (I) et la quantité de phosphate adsorbé sur les solides du sol (Q) respectivement. Ces deux paramètres déterminent le pouvoir tampon du sol (Barrow, 1967 ; Holford, 1976). Selon Kamprath et Watson (1980), le pouvoir tampon des sols acides ou neutres est une fonction des quantités et la cristallinité des oxydes hydratés de Fe et Al, alors que dans des sols calcaires, les quantités de Ca échangeable et $CaCO_3$ déterminent le P pouvoir tampon.

b. Diffusion du P dans le sol

La diffusion du phosphore dans le sol vers les racines est le mécanisme dominant régissant l'absorption du P par les racines. Barrow (1989) a suggéré que phosphate se déplace principalement aux racines des plantes par diffusion et c'est seulement le phosphate dans la solution du sol qui est libre de ses mouvements. La racine de la plante diminue le phosphore du sol principalement en absorbant de la solution du sol, ce qui déclenche la diffusion de P dans la solution du sol vers les racines des plantes et la dissolution du phosphore de la phase solide, appelée le pool labile (Schofield, 1955). Le

gradient de concentration dans le sol à travers la surface des racines est un facteur important influençant la diffusion P (Kamprath et Watson, 1980). La texture du sol est un autre facteur affectant la diffusion de P (Olsen et Watanabe, 1965). Augmentation de la teneur en argile, les coefficients de diffusion augmentent en raison d'une diminution de tortuosité et une augmentation du pouvoir tampon. Fitter (1992) a déclaré qu'un ion phosphate se déplace normalement moins d'un millimètre à travers le sol dans une journée. Le coefficient de diffusion pour l'ion de phosphate dans l'eau est de $0,89 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$. Par contre diffusion de phosphore dans le sol est plus lente que dans l'eau pure.

c. Etat hydrique du sol

Saxena (1979) rapporte que chez le blé dans une expérimentation en pot en comparant, l'effet de l'apport de N et de P sous trois régimes hydriques. En conditions très limitantes en eau, ni l'apport de N ni celui de P n'ont eu d'effet sur la culture.

d. Morphologie racinaire

Un processus important pour répondre aux variations de la disponibilité en P est la plasticité de l'architecture racinaire, d'une part en réponse à un enrichissement local en P et d'autre part à des conditions de carence en P très forte. Par exemple, Drew (1975) a montré qu'une céréale comme l'orge est capable de produire plus de racines, plus ramifiées, pour explorer des zones enrichies en P. Otani (1996), étudiant plusieurs espèces végétales, a trouvé que les prélèvements du P ont été très corrélés à la longueur racinaire surtout en condition de disponibilité de phosphore mais pas en conditions de déficience en cet élément ou si le volume de sol était réduit. Chez le blé, le développement du système racinaire a été l'un des caractères associés aux génotypes efficaces vis à vis du P (Liu et al., 1998).

e. Exsudats racinaires

Dans les conditions de déficience phosphatée, notamment dans les sols riches en calcaire où le phosphore serait très lié aux ions Ca, il a été montré que les plantes sécrètent au niveau de la rhizosphère des acides organiques pour mobiliser le phosphore fixé (Lopez-Bucio et al., 2000a). Dans une expérimentation sur différentes espèces végétales, Tadano et al. (1993) ont trouvé que l'activité de la phosphatase, sécrétée par les racines, augmentait en condition de déficience phosphatée.

**CADRE DE L'ÉTUDE ET DÉMARCHÉ
EXPÉRIMENTALE****II**

Cette partie est une présentation de la démarche expérimentale qui recense les informations sur le cadre de l'étude, le détail sur la méthode mise en œuvre pour le choix du matériel sol, les techniques d'analyse employées, la démarche méthodologique adoptée ainsi que la présentation des différentes études effectuées.

Nous avons choisi la région de l'Oued Righ pour réaliser notre travail expérimental vu son importance agronomique dans le Sud-est algérien et afin de répondre aux objectifs de la thèse, plusieurs expériences ont été menées dans la station expérimentale du CRSTRA. Ce chapitre est consacré à la présentation des matériels et des méthodes d'étude adoptée.

II.1. Cadre de l'étude**II.1.1. Présentation générale**

La vallée de l'Oued Righ est une entité agro écologique bien précise qui désigne une vallée de palmeraies située au Nord-Est du Sahara algérien, le long du grand Erg oriental et au Sud de l'Aurès. Cette région a pour principale activité, la culture du palmier dattier, vocation ancienne, comme en témoigne un texte d'Ibn Khaldoun qui l'a décrite au XIV^{ème} siècle après un séjour à Biskra (Perennes, 1979). Grâce à la disponibilité en eau, et aux conditions climatiques, l'Oued Righ est la première région phoenicicole du Sahara algérien, par la quantité et la qualité (Côte, 1998). Cette vallée, d'une cinquantaine d'oasis, est une des régions les plus anciennement cultivées du Sahara et une des mieux connues. C'est une succession en chapelet de dépressions humides et salées et de palmeraies dont les villages anciens sont installés sur des buttes (Dubost, 1991).

II.1.2. Situation géographique et administrative

La vallée de l'Oued Righ est une entité géographique située dans le Nord-Est du Sahara Algérien dans une dépression de forme allongée (Latitude : 32°53'50" à 34°10'00" N ; Longitude : 5°47'50" à 6°10'00" E) (Fig. II-1). Elle s'étire du Sud au Nord, entre Goug et Oum El-Tiuor, sur 160 Km de longueur et de 30 à 40 km de largeur suivant les

endroits (Dubost, 1991 ; Dubost, 2002 et Khadraoui, 2005). Elle est limitée au Nord par le plateau de Stil, à l'Est par les grands alignements dunaires de l'Erg oriental, au Sud par l'extension de l'Erg oriental et à l'Ouest par le plateau Mio-Pliocène (Dubost, 1991).

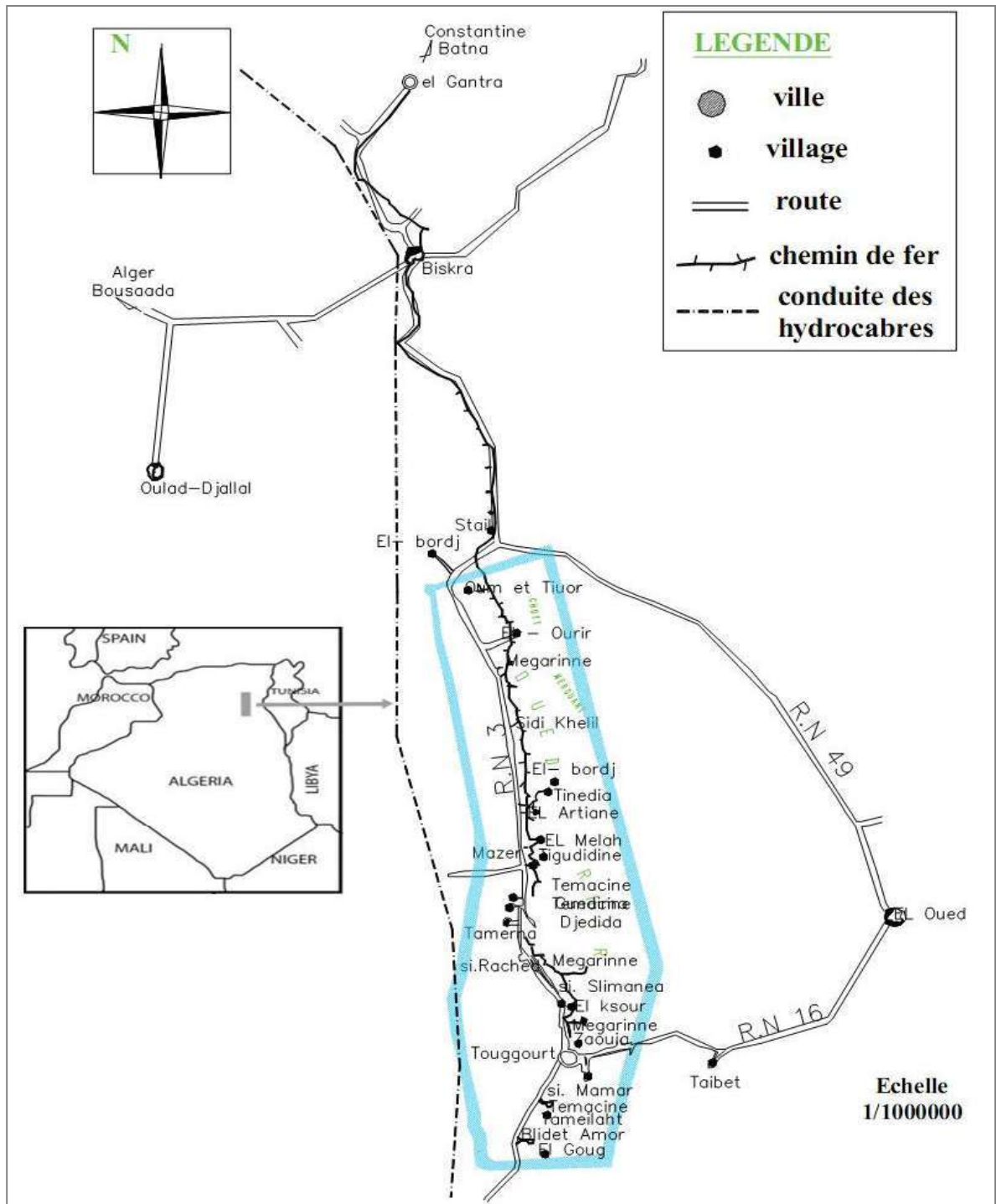


Figure II-1 : Situation géographique et administrative de l'Oued Righ (TESCO-VIZITERV, 1989 - modifiée).

II.1.3. Caractéristiques climatiques

La région Saharienne est caractérisée par un climat contrasté avec une saison chaude et sèche, et des amplitudes thermiques importantes ainsi que par des vents fréquents et violents. La pluviométrie quasiment nulle, rend impossible toute agriculture sans irrigation (Messar, 1996).

a. Température

Les températures accusent des écarts journaliers et saisonniers importants. La moyenne annuelle est de l'ordre de 21,97 °C avec de fortes variations saisonnières : 28,2 °C en juillet et 4,63 °C en janvier. La température maximale enregistrée est de 42,21 °C en mois de Juillet, tandis que le minimum absolu est de 4,6 °C en Janvier (Tableau II-1).

Tableau II-1 : Données climatiques moyennes de la région de l'Oued Righ entre 2004 et 2013 (ONM Touggourt, 2014)

Paramètres	J	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D
T° minimale (°C)	4,63	"5,94	"10,4	"13,97	"19,08	"23,92	"28,2	"26,41	"22,54	"17,1	"9,75	"8,35
T° maximale (°C)	17,48	"19,26	"24,4	"28,81	"33,56	"38,61	"42,21	"41,81	"35,67	"30,3	"23,11	"16,2
T° moyenne (°C)	10,9	"14,3	"17,4	"20,8	"23,6	"30,2	"33,1	"35,1	"27,7	"24,7	"14,3	"11,6
Précipitations (mm)	26,13	"1,26	"8,21	"11,85	"2,4	"1,28	"0,35	"7,12	"6,17	"7,93	"5,94	"6,48
Humidité relative (%)	64,35	"53,56	"46,53	"42,58	"36,76	"32,2	"29,4	"32,45	"43,5	"49,16	"57,51	"65,18
Evaporation (mm)	74,27	"107,02	"150,3	"177,98	"222,29	"288,1	"321,39	"268,1	"198,5	"157,91	"116,79	"70,85
Vitesse du vent (m s ⁻¹)	2,36	"2,89	"3,56	"3,83	"3,83	"3,45	"2,96	"3,06	"2,82	"2,44	"2,28	"2,2
Insolation (h mois ⁻¹)	250,5	"238,75	"229,1	"291,84	"327,32	"313,6	"363,63	"337,6	"227,4	"265,75	"253,11	"231,4

b. Précipitations

Les précipitations sont très faibles et très irrégulières et se concentrent entre les saisons automnales et printanières. Par contre il y a une faible ou absence totale de précipitations durant le reste de l'année. Le cumul annuel des précipitations pour une période de dix ans (2004-2013) est de 75,13 mm. Les écarts interannuels sont énormes, de 16,18 mm en 2004 mm à 2,14 en 2011. La pluviométrie accuse un maximum de 26,13 mm pendant le mois de Janvier (Tableau II-1).

c. Humidité relative de l'air

La région de l'Oued Righ est caractérisée par une faible humidité relative de l'air. L'humidité relative moyenne varie entre 29,4 % en Juillet et 65,18 % en Décembre.

L'humidité moyenne annuelle est de 46,09 % (Tableau II-1). Selon Grinev (1969) l'humidité est fonction de la température de l'air et du vent. Les vents du Nord et du Nord-Est amènent généralement l'air humide et ceux du Sud et du Sud-Ouest la sécheresse.

d. Vents

Les vents du printemps sont les plus fréquents et les plus violents avec des vitesses qui varient entre 2,2 à 3,83 m s⁻¹. Les vents deviennent importants à partir d'Avril à Juillet. Pendant cette période, le sirocco souffle violemment et provoque l'entraînement des matériaux sableux sans cohésion. Il est de ce fait, responsable de la formation dunaire (Sogetha-Sogreah, 1970). Selon l'ONM (2014), les vents d'Ouest dominant en hiver, tandis qu'au printemps, ce sont ceux du Nord-Est, alors qu'en été ce sont ceux du Sud-Ouest qui dominent. Grinev (1969) avance que les vents sont plus forts à la fin de l'hiver et au printemps ; les vents de sable arrivent en mars, avril et mai, et le vent sirocco souffle principalement en juin et parfois en avril, mai et juillet.

e. Insolation

La durée d'insolation devient très importante à partir de Mars jusqu'à Octobre avec une durée moyenne annuelle de 281,66 h mois⁻¹.

f. Evaporation

L'évaporation est très faible dans la période froide de l'année. Par contre, elle devient très importante dans la période estivale un maximum de 321.39 mm enregistrée au mois de juillet. L'évapotranspiration potentielle (ETP) maximum connaît une importante variation saisonnière ; elle est également fonction de l'humidité, du vent et de la température. Pour cela, l'évapotranspiration mensuelle en hiver est trois fois moins importante que l'évapotranspiration mensuelle en été (Grinev, 1969). L'ETP moyenne mensuelle minimum est de 2 mm j⁻¹ en décembre et l'ETP moyenne mensuelle maximum est de 10 mm j⁻¹ en juillet, alors que l'ETP moyenne annuelle est de 6 mm j⁻¹.

II.1.4. Synthèse climatique

La région de l'Oued Righ a un climat du type saharien, caractérisé par des précipitations très peu abondantes et irrégulières, par des températures élevées accusant des amplitudes thermiques importantes avec des fortes variations saisonnières. On observe des fréquentes rosées en hiver (Sogétha-Sogréah, 1970) et par une faible humidité relative de l'air. Les vents sont fréquents et violents et la luminosité est

importante (Dubief, 1952 et Khadraoui, 2005). Bagnouls et Gaussen (1953) proposent de définir les conditions bioclimatiques d'une région par l'importance de la saison sèche. A cet effet ils considèrent que l'interaction des deux courbes (P et T) permet de définir, la saison sèche ($P \text{ mm} < 2 T \text{ }^\circ\text{C}$) et la période humide ($P \text{ mm} > 2 T \text{ }^\circ\text{C}$). Le diagramme ombrothermique, établi sur les données de 10 ans, fait ressortir que la région de l'Oued Righ est caractérisée par une longue période sèche qui s'étale pratiquement sur 11 mois (Fig. II-2).

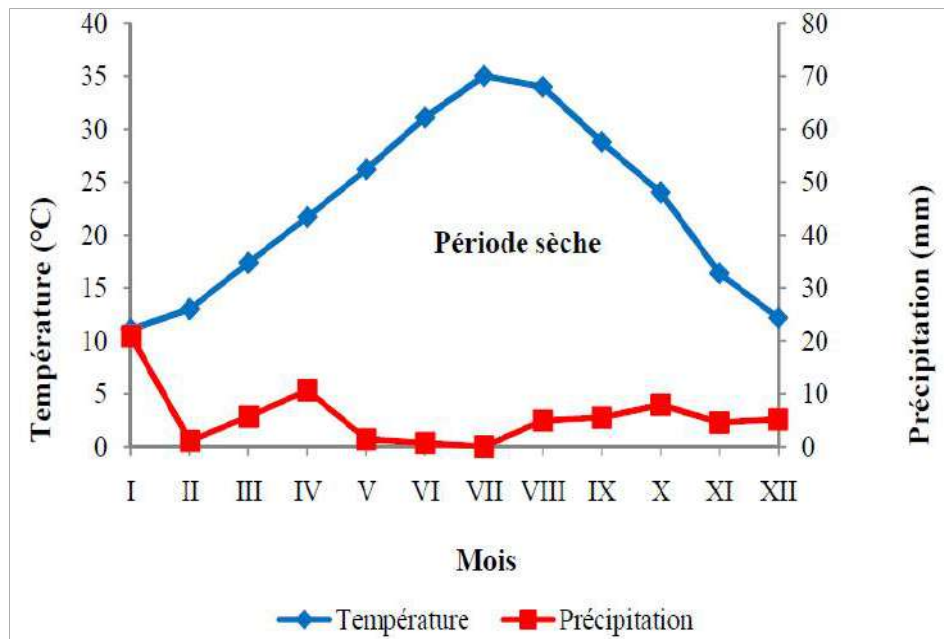


Figure II-2 : Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gaussen de la région de Touggourt entre 2004 et 2013

Le quotient pluviothermique d'Emberger (Q_3) élaboré en 1990 est spécifique Méditerranéen, il tient compte des précipitations et des températures, et nous révèle l'étage bioclimatique de la région d'étude et de donner une signification écologique du climat. Nous avons utilisé la formule établit par Stewart (1969) adaptée pour l'Algérie et le Maroc, comme suit :

$$Q_3 = 3,43 \times P / M - m$$

Avec :

Q_3 : Quotient pluviothermique d'Emberger ; P : Précipitation annuelle en mm ; M : Température maximale moyenne du mois le plus chaud en $^\circ\text{C}$; m : Température minimale moyenne du mois le plus froid en $^\circ\text{C}$.

Après l'emplacement de « $Q_3=6,09$ » sur le climagramme pluviothermique d'Emberger, la région de l'Oued Righ est situé dans l'étage bioclimatique saharien à hiver

doux (Fig. II-3).

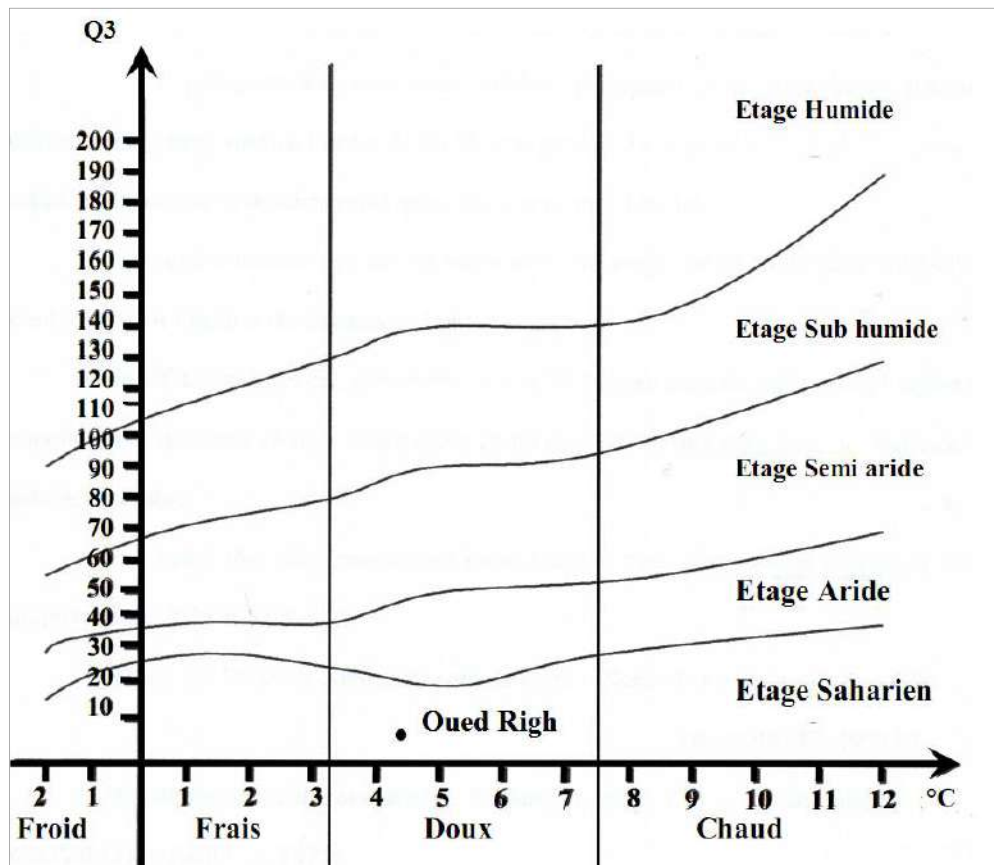


Figure II-3 : Climagramme pluviométrique d'Emberger de la région d'étude

II.1.5. Géologie et géomorphologie de la région

Géologiquement, la région de l'Oued Righ fait part de la plateforme saharienne, elle s'étend sur des ensembles géologiquement différents totalement aplatis au début de l'Ere secondaire ; elle se comporte actuellement comme une vaste dalle rigide et stable (Fig. II-4).

Notre région étudiée apparaît comme un vaste fossé synclinal dissymétrique qui est limité :

- ✓ Au Nord, par l'accident Sud Atlasique ; et les premiers contreforts des monts des Aurès.
- ✓ Au Sud, par la falaise méridionale du TINHERT.
- ✓ A l'est par les affleurements crétacés du DAHAR.
- ✓ A l'Ouest par la dorsale du Mzab.

Donc c'est entre la bordure septentrionale du Hoggar et la bordure méridionale de l'Atlas saharien que se situe le grand bassin sédimentaire du Bas-Sahara, s'étend des pieds

de l'Aurès au Nord jusqu'au Tassilis au Sud. Le Grand Erg Oriental présent une couverture sur une grande partie du bassin est, soit 125000 Km². La vallée de l'Oued Righ fait partie de cet ensemble (ANRH, 2006).

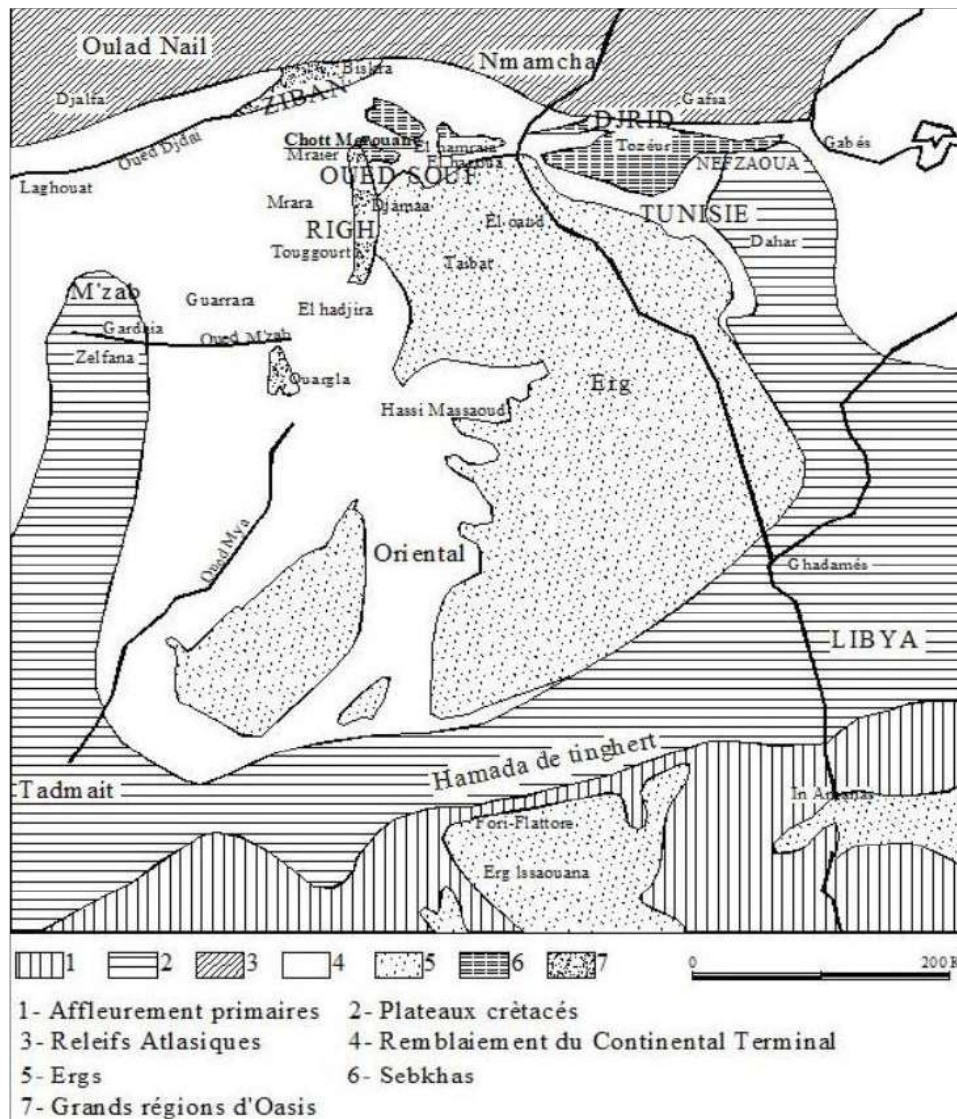


Figure II-4 : Les grandes unités géologiques au Sahara (Nesson, 1978)

Les principales formations géomorphologiques à Oued Righ par rapport à la carte du Sahara septentrional sont comme suit :

- ✓ Les regs : sont des plateaux caillouteux dont les plus vastes sont le Tanezrouft au sud et le Tadmait au centre. On peut y associer les hamadas, plateaux recouverts d'une couche dure.
- ✓ Les ergs : sont des massifs de dunes dont trois ont une importance considérable : l'Erg Chèche, le grand Erg oriental et le grand Erg occidental.
- ✓ Les plaines et vallées alluviales : qui témoignent de la présence de nombreux oueds au début du quaternaire.

Le bassin versant d'Oued-Righ présente des terrains du type quaternaire continental récent, composés d'alluvions anciens constituant. Aussi ils sont constitués de calcaires, de grès et d'argiles. Notant la présence de dayas, hamadas « reg » et de dunes vives « erg » (Aissani et Bettahar, 2001).

II.1.6. Hydrologie de la région

Le bassin artésien de l'Oued-Righ est un des plus importants du monde déclare par Perennes (1979). En effet, dans cette région l'alternance de couche imperméable et de couches aquifères d'une part, l'existence d'un fossé de subsistances d'autre part, ont permis la formation de nappes souterraines superposées (Fig. II-5). Sur toute l'étendue de la région d'Oued Righ, les trois nappes ont été reconnues. Une nappe libre (phréatique) et deux nappes capitales : la nappe du complexe terminal et la nappe du continental intercalaire (ANRH, 2006).

- a. **Nappe phréatique :** Dans la partie supérieure des formations continentales, les nappes non captives profondes de 02 à 10 m viennent augmenter les réserves hydrauliques du Bas Sahara. La nappe phréatique est omniprésente dans toutes les oasis de la vallée d'Oued Righ. Les analyses des eaux de la nappe phréatique montrent qu'elle est très salée, la conductivité électrique est de l'ordre de 10 mmhos cm^{-1} à 36 mmhos cm^{-1} dans la majorité des cas (Messahel et Meza, 2004).
- b. **Nappe du complexe terminal :** La nappe du complexe terminal couvre une importante partie du Sahara septentrional (environ 350,000 Km^2). Elle est en général peu profonde (100 à 400m). Sa température est de l'ordre de 20 à 30 $^{\circ}\text{C}$ en tête de forage (ANRH, 2006). Cette nappe, qui était à l'origine artésienne dans toute la région d'Oued Righ, est actuellement marquée par une forte baisse de l'artésianisme des pompages. Trois nappes ont été décrites, elles sont plus ou moins indépendantes :
 - ✓ La première nappe est en réalité un réseau de petites nappes communicantes ; elle est située dans les sables argileux du Pliocène.
 - ✓ La deuxième nappe est constituée dans les sables de Miocène supérieur.
 - ✓ La troisième nappe est située dans les calcaires fissurés de l'Éocène inférieur (ANRH, 2006). A l'origine, ces trois nappes étaient artésiennes sur l'ensemble de la vallée de l'Oued Righ.
- c. **La nappe du continental intercalaire :** La nature lithologique de cette nappe est du

gré hétérogène. Elle est captée à une profondeur de 1760 m au Nord de la vallée. La qualité chimique de l'eau est légèrement meilleure par rapport à celle de la continentale terminale ; le résidu sec varie entre 1,6 g L⁻¹ et 1,9 g L⁻¹ (ANRH, 2006).

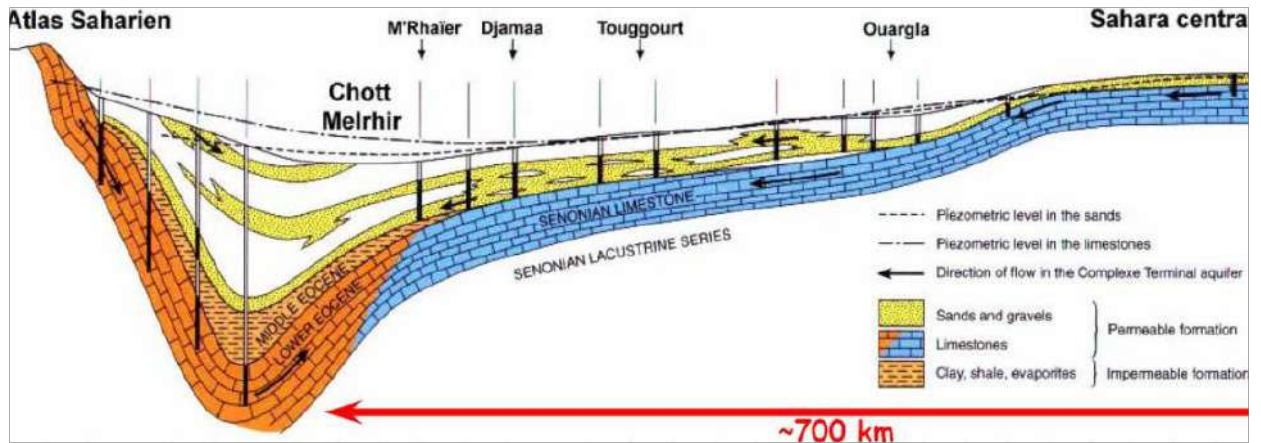


Figure II-5 : Coupe hydrogéologique transversale du "CT" (UNESCO, 1972)

II.1.7. Aperçue pédologique

Les sols de la zone aride de l'Algérie présentent une grande hétérogénéité et ils se composent essentiellement par des sols minéraux bruts, des sols peu évolués, des sols halomorphes et des sols hydromorphes (Halitim, 1988). Les études faites par (Sogeta-Sogreah, 1970) dans la vallée de l'Oued-Righ, montrent que les sols sont d'origine alluviale et éolienne. Les sols les plus favorables à l'agriculture se situent dans les vallées (dayas) et les plaines sableuses. Selon FAO (2005), en Algérie on peut rencontrer des sols à accumulations calcaires en profondeur (chatins et bruns iso humiques) dans les bioclimats semi-arides et arides (calcisols). Dans le Sahara septentrional d'Algérie la teneur en calcaire est très faible et concentrée surtout dans les sols alluvionnaires (Djili et al., 1999).

II.2. Approche méthodologique

Nous avons choisi comme lieu de travail, la station expérimentale du centre de recherche scientifique et technique sur les régions arides (CRSTRA) que se situe à Touggourt. Cette station a été créée en 2007. Elle se situe au sud de la ville de Touggourt sur la limite sud de la commune de Nezla à gauche de la route nationale N°3 (Latitude : 33° 4' 36" N ; Longitude : 6° 2' 29" E).

Notre approche méthodologique consiste à étudier sur des sols alluvionnaires calcaires échantillonnés de l'Oued Righ, la dynamique du phosphore, facteur fertilisant limitant, dans des sols calcaires, comme suit (Fig. II-6) :

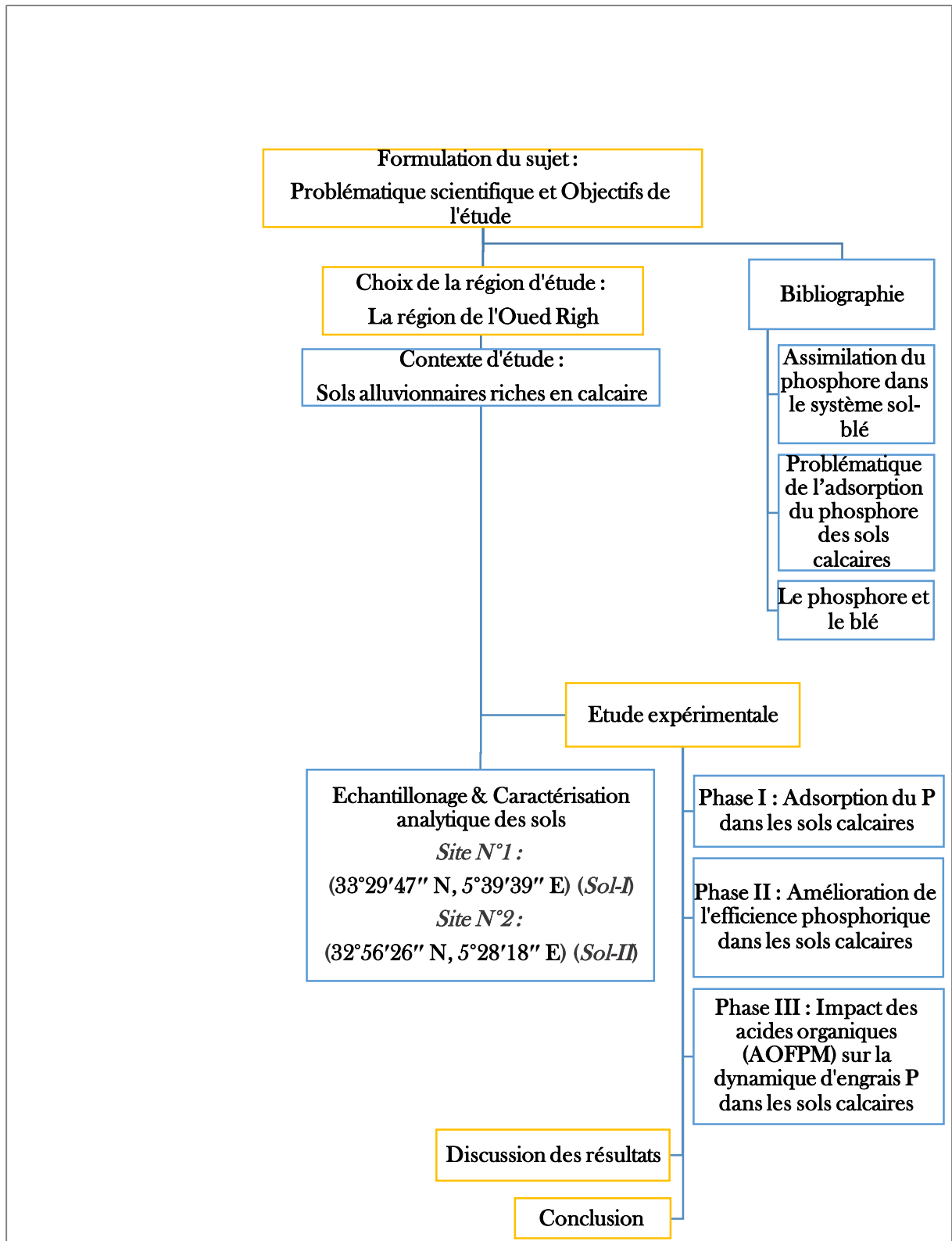


Figure II-6 : Organigramme synthétique de la méthodologie de travail

II.2.1. Sols étudiés

En général le sol saharien ne constitue qu'un simple support à toute activité agricole. Un agriculteur au Sahara est appelé à utiliser beaucoup plus d'engrais qu'un agriculteur dans les régions du Nord du pays.

D'après Djili et *al.* (1999), les sols calcaires au sud algérien sont concentrés surtout dans les sols alluvionnaires. Djili (2000), ajoute que le profil calcaire en Algérie est en fonction de la pluviométrie et pour les zones arides ($P < 300$ mm) : l'accumulation de calcaire semble être homogène dans tout le profil, mais avec un pourcentage de calcaire légèrement plus élevé dans les horizons de Sub- surface. Hopkins et Ellsworth (2005) ont défini le sol calcaire comme étant un sol contenant du CaCO_3 libre en quantité suffisante (carbonate de calcium ou magnésium). Pour cela, il a été retenu comme type de sol, les sols alluvionnaires riches en calcaire qui se situent dans la région de l'Oued Righ.

De ce fait, Pour connaître la localisation des sols riche en calcaire dans la région de l'Oued Righ, des observations préliminaires au champ ont été effectuées en utilisant des cartes et des études précédentes afin d'avoir des informations générales sur les types des sols. Des sondages à la tarière ont été réalisés, on se fondant sur les critères : sol naturel (nu), aspect de surface et texture du sol, aptitude à la mise en valeur et présence du calcaire.

Selon ces derniers critères nous avons opté pour les deux (02) différents sites suivants :

- **Site N°1 (S-I)** : Ce site se localise à $33^{\circ}29'47''$ N, $5^{\circ}39'39''$ E (à droite de la route qui mène Djamaa à M'Rara).
- **Site N°2 (S-II)** : Ce site se localise à $32^{\circ}56'26''$ N, $5^{\circ}28'18''$ E (à gauche de la route qui mène Touggourt à Blidet Amor).

II.2.2. Etude des sols échantillonnés

Les sols alluvionnaires calcaires S-I et S-II sont caractérisés morphologiquement avant l'échantillonnage pour les essais de la dynamique phosphorique.

a. Description morphologiques des sols

Avant de faire l'échantillonnage du sol, nous avons commencé par une description morphologique de deux profils pédologiques relatifs aux sols sélectionnés S-I et S-II. La description des profils a été effectuée en suivant les recommandations de Baize et Jabiol (1995).

- *Caractères pour présenter l'environnement de chaque profil* : localisation, végétation, état de surface, temps, topographie.
- *Pour la description morphologique des horizons* : l'épaisseur en (cm), la texture et la structure, la couleur (Munselle Soil Color Charts), la réaction à l'HCl, les taches, les éléments grossiers, la transition et la limite entre les horizons.

b. Echantillonnage des sols

Le fond du labour est souvent utilisé comme repère pour le choix de la profondeur d'échantillonnage (Aït Houssa et *al.*, 2004). Ainsi que d'un point de vue fertilité chimique, souvent couche arable et sous-sol sont l'un à l'image de l'autre (Aït Houssa et *al.*, 1989). De ce fait, pour l'échantillonnage du sol nous avons opté pour le choix de la couche superficielle (0-30 cm), puisque cette profondeur représente la couche arable du sol. Après la réalisation des profils pédologiques et leur description. Nous avons effectué neuf prélèvements aléatoires à la tarière au niveau de la couche supérieure 0-30 cm de S-I et S-II pour constituer un échantillon moyen représentatif de chaque sol par le mélange des différents prélèvements. Les échantillons de sol ont été séchés à l'air libre, broyés et tamisés à 2 mm puis transporter au laboratoire pour l'expérimentation.

c. Caractéristiques des sols échantillonnés

Avant d'engager l'étude expérimentale, des analyses physico-chimiques ont été effectués pour permettre la caractérisation des échantillons des sols.

II.2.3. Etude de la dynamique du phosphore

L'étude de la dynamique du phosphore dans les sols échantillonnés a été réalisée en trois phases expérimentales, comme suit :

II.2.3.1. Phase I : Etude de l'adsorption du phosphore dans les sols calcaires

A l'heure actuelle, les pratiques de la fertilisation phosphatée ainsi que l'évaluation de la biodisponibilité du P dans les sols riches en calcaire restent évaluées exclusivement via l'utilisation de méthodes chimiques dont il n'y a aucune information sur les différents paramètres régissant la sorption (adsorption et précipitation) des ions phosphates, ainsi que sur les besoins en phosphore pour un rendement optimal des cultures. Or, nous venons de voir que ces méthodes sont approximatives et qu'une approche mécaniste serait plus appropriée intégrant mieux les processus écologiques, et favorisant à la fois une production de qualité et le maintien de la productivité des sols sur le long terme. Cela

implique notamment de développer les solutions pour avoir une meilleure fertilisation de productions agricoles. Ce constat soulève l'objectif de l'étude qui vise à trouver les relations qui peuvent exister entre le niveau de calcaire et la capacité d'adsorption du phosphore dans les sols de l'Oued Righ et leurs effets sur le phosphore disponible. Des expérimentations au laboratoire étaient conduites sur les deux types de sol sélectionnés pour atteindre les objectifs suivants :

- Modélisation de la sorption du phosphore dans les sols calcaires et ses indices descriptifs ;
- Caractérisation des indices de la sorption du phosphore : une approche pour prédire les besoins en phosphore des sols calcaires ;
- Développer des relations entre les niveaux de calcaire des sols et les besoins en phosphore calculées afin de pouvoir calculer les apports phosphatés à n'importe quel niveau de calcaire dans le sol.

a. Matériel d'essai utilisé

Les deux sols étudiés (S-I et S-II) sont les sols issus de deux sites choisis évoqués précédemment. Les sols sont amendés en calcaire et en phosphore :

- D'une manière générale, la majorité des sols cultivés en Algérie ont une teneur en calcaire plus ou moins appréciable. De ce fait, afin de ressentir le comportement du phosphore dans le sol en fonction de sa teneur en calcaire, des apports en calcaire ont été employés. Le calcaire apporté est à l'origine d'un minerai de calcaire. Trois niveaux de doses du calcaire ont été employés à savoir : Traitements sans apport (témoin), des traitements à 25 % de CaCO_3 (traitements modérément calcaires) et 50% de CaCO_3 (traitements fortement calcaires). Ces pourcentages sont choisis suivants les données de la littérature (Day, 1983 ; Lozet et Mathieu, 1990 ; Luttmerding et *al.*, 1990 ; Baize, 2000).
- Pour cette expérimentation le KH_2PO_4 (Hydrogéné-phosphate de potassium) est pris comme source de phosphore.

b. Démarche expérimentale

L'expérimentation a nécessité deux étapes. La première est l'incubation des échantillons des sols et la deuxième consiste à étudier la sorption de phosphore :

- **Expérimentation d'incubation** : les échantillons des sols, séchés à l'air libre sont

bien mélangés avec le calcaire (CaCO_3) ; trois traitements y compris les témoins (sols sans amendement de CaCO_3), S-I₂₅, S-II₂₅ (sols avec 25 % de CaCO_3) et S-I₅₀, S-II₅₀ (sols avec 50 % de CaCO_3) ont été développés. Un kilo de chaque traitement a été pris dans des pots en plastique et mouillé avec de l'eau distillée pour atteindre la capacité au champ et équilibré pendant 15 jours dans l'obscurité à 25°C. Tous les traitements sont maintenus à 80 % de leurs capacités au champ tout au long de l'expérimentation par des apports d'eau. À la fin de l'incubation, les traitements ont été mélangés, séchés et passés à travers un tamis de 2 mm et stockés dans des bouteilles en plastique pour l'utilisation dans les études d'adsorption.

- **Etude de la sorption de phosphore :** les isothermes d'adsorption sont employées pour mesurer les capacités d'adsorption de phosphate des sols, pour évaluer l'effet résiduel des engrais phosphatés et estimer les besoins en P des sols et des cultures (Fox et Kamprath, 1970 ; Hassan et al., 1994 ; Chaudhry et al., 2003).

c. Méthodologie des isothermes d'adsorption

Les isothermes d'adsorption ont été obtenus en secouant 4 g de sol exactement pesé dans un tube à centrifuger 50 mL avec un bouchon à vis auquel a été ajoutée une solution d'équilibre de KH_2PO_4 contenant 0, 10, 20, 30, 50 et 100 $\mu\text{g P mL}^{-1}$. La solution d'équilibre inclut 0,01 M CaCl_2 , qui a été un électrolyte de support et il peut simuler l'eau dans les pores du sol dans des sols calcaires (Robbins et al., 1999) et le rapport sol : solution est (1:10). Trois à quatre gouttes de toluène ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$) ont été ajoutées pour inhiber l'activité microbienne. Les tubes sont incubés à 25° C pendant une semaine avec une agitation quotidienne de 2 heures. À la fin de la période d'incubation, les tubes sont centrifugés à 4000 tr min^{-1} pendant 10 min et filtrés. La teneur en P dans le surnageant a été mesurée à l'aide de spectrophotomètre Jenway 6310 par la méthode colorimétrique à l'aide d'acide ascorbique et le molybdate d'ammonium (Murphy et Riley, 1962) dans laquelle : 20 mL du surnageant est prélevée et met dans bécher de 25 ml, puis 5 mL de la solution mixte d'extraction de 100 mL contenant : 50 mL d'acide sulfurique, 15 mL de molybdate d'ammonium et 30 ml d'acide ascorbique est ajouté. Après le développement de la coloration bleue, lire sur colorimétrie à la longueur d'onde de 882 nm.

d. Paramètres étudiés

A partir de l'étude de la sorption de phosphore, nous estimons la quantité de

phosphore absorbée pour les différents traitements et modulée selon Langmuir et Freundlich, comme suit :

- **La quantité de phosphore adsorbée (Q)** a été calculée par l'équation suivante :

$$Q = \frac{V \times \Delta C}{M}$$

Où : Q = Quantité adsorbée ($\mu\text{g g}^{-1}$), ΔC = Différence entre la concentration initiale et finale (à l'équilibre) de phosphate dans le surnageant (mg P L^{-1}), V = Volume de la solution d'équilibre (40 mL), M = Masse du sol (4 g). La mesure a été faite en quatre répétitions de mesure, dont les moyens ont été utilisés pour les calculs prochains. Les données obtenues par cette expérience ont été modulées en utilisant le formalisme de Freundlich. Le modèle de Freundlich est considéré comme pragmatique dans la nature, mais a été largement employé pour décrire l'adsorption de phosphate par les sols (Hussain *et al.*, 2003 ; Gregory *et al.*, 2005).

- **Modèle de Langmuir**

$$\frac{C}{X} = \frac{C}{X_{max}} + \frac{1}{K \times X_{max}}$$

Où : C = Concentration de phosphore dans la solution à l'équilibre (mg P L^{-1}), S = mg of P adsorbé (mg P kg^{-1}), K = Constante reliée à l'énergie de liaison ($\text{mL}\mu\text{g}^{-1}$ de phosphore), et où X_{max} = Capacité maximale d'adsorption de Langmuir ($\mu\text{g g}^{-1}$ de phosphore). Les différentes constantes sont obtenues par le calcul de la pente de l'équation ($1/X_{max}$) et de l'ordonnée à l'origine ($1/kb$) dans la représentation C/X en fonction de C.

- **Modèle de Freundlich**

$$X = a \times C^n$$

Où : X = Quantité de phosphore adsorbé par gramme de sol ($\mu\text{g P g}^{-1}$ de sol), C = Concentration de P dans la solution de l'équilibre (mg L^{-1}), (a) = Capacité de sorption ($\mu\text{g g}^{-1}$), et n = Energie de sorption de phosphate (mL g^{-1}). Les paramètres (a) et (n) ont été estimés par la régression de la forme logarithmique des données obtenues par l'isotherme de sorption.

Le paramètre de Freundlich a été employé pour être un paramètre pratiquement utile en récapitulant les propriétés d'adsorption de sols par rapport à plusieurs

concentrations d'équilibre. Le Langmuir a ses mérites à la basse concentration de P et il est justifiable pour employer le paramètre de Langmuir KX_{max} pour caractériser le sol seulement à de basses intensités de P.

Puisque les sols dans cette étude étaient enclins à la fixation élevée de P, donc, les deux modèles de Freundlich et celle de Langmuir ont été employés pour calculer les exigences externes en phosphore (EPR). C'est une évaluation de potentiel de la sorption de P (Jackman et *al.*, 1997 ; Wang et *al.*, 2000). Plusieurs études ont prouvé que, la quantité de P en équilibre avec 0,2 mg de P L⁻¹(EPR_{0.2}) a montré qu'est le seuil optimum pour le développement de la plupart des cultures (Beckwith, 1965 ; Iyamuremye et *al.*, 1996 ; Nziguheba et *al.*, 1998).

Dans notre cas, le calcul des EPR_{0.2} pour atteindre le niveau de 0,2 mg de P L⁻¹ dans la solution du sol est fait en utilisant dans le cas du modèle de Freundlich, la version linéaire comme suit :

$$EPR_{0.2} = 10^{\log X}$$

Où : $\log X = \log a + n \log C$; C = Concentration désirée en P dans la solution du sol (0,2 mg de P L⁻¹).

Quant au deuxième modèle, le calcul des EPR_{0.2} ont été déterminés en substituant la concentration désirée (0,2 mg de P L⁻¹) dans les équations de Langmuir (Dodor et Oya, 2000).

$$EPR_{0.2} = \frac{X_{max} \times K \times C}{1 + (K \times C)}$$

Où : C = Concentration désirée en P dans la solution du sol (0,2 mg de P L⁻¹). K = Constante reliée à l'énergie de liaison (mL µg⁻¹ de phosphore), et où X_{max} = Capacité maximale d'adsorption de Langmuir (µg de P g⁻¹ sol).

e. Méthodes de caractérisation des sols

Les caractéristiques étudiées ont été déterminées à l'aide des techniques suivantes :

- L'analyse granulométrique des échantillons de sols a été effectuée par la méthode internationale de la pipette de Robinson (Gee et Bauder, 1986). Cela consiste en premier lieu à la destruction de la matière organique du sol en utilisant de l'eau oxygénée et à la dispersion des argiles par l'hexaméthaphosphate de sodium. La détermination des différentes fractions granulométriques du sol

(argile, limon, sable) est réalisé en prélevant au moyen de la pipette (argile, limon fin) et par tamisage (Sable fin et sable grossier).

- La capacité de rétention en eau (pF 2,5) et le point de flétrissement (pF 4,2) ont été déterminées à la presse à membrane.
- Le pH_{eau} : La méthode électrométrique à l'électrode de verre à l'aide d'un pH-mètre avec un rapport sol: solution de: 1:2,5 est utilisée (Baruah et Barthakur, 1997).
- Le carbone organique a été quantifié par la méthode de perte au feu (Abella, 2006). Cette méthode consiste à sécher le sol à 105°C pendant 2h et enregistrer le poids, puis augmenter la température à 360°C pendant 2h et compter le poids, donc le carbone organique (%) est calculé par la différence entre les deux mesures $[(\text{poids à } 105^{\circ}\text{C} - \text{poids à } 360^{\circ}\text{C})] \times 100 / \text{poids à } 105^{\circ}\text{C}$. La matière organique est estimée en multipliant le carbone organique par 1,72.
- Le calcaire total : La méthode est passée par deux étapes, dont premièrement les échantillons du sol sont attaqués par l'HCl (1N) pendant une nuit. La deuxième étape est la titration de la solution par la soude : NaOH (1N) en présence de phénolphtaléine comme un indicateur coloré (Estefan, 2013).
- La conductivité électrique a été mesurée à l'aide d'un conductimètre et selon un rapport sol:eau = 1:5. Elle est exprimée en dS m^{-1} .
- Le phosphore assimilable : l'extraction est réalisée dans une solution de bicarbonate de sodium 0,5N ajusté à $\text{pH} = 8,5$ dans un rapport prise d'essai: volume d'extraction (m:v = 1:20) (Watanabe et Olsen, 1965). 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. Le phosphore contenu dans le surnageant est extrait par la procédure de Murphy et Riley (1962).
- Le pH_{KCl} , calcium et phosphore soluble : les échantillons du sol sont mélangés pendant 15 min avec le KCl (0,01M) dans un rapport prise d'essai : volume d'extraction (m:v = 1:10), puis incubé à 25°C pour 15h, après cela la suspension est filtrée et le pH, le calcium et le phosphore soluble sont déterminés (Black,

1980).

f. Analyse statistique des données

En outre, Une régression entre les niveaux de CaCO_3 et les besoins d'engrais P a été développée pour estimer les exigences externes de phosphore ($\text{EPR}_{0.2}$) pour n'importe quel niveau de CaCO_3 dans le sol. Les techniques de régression ont été utilisés pour la validation du modèle et de déterminer la relation fonctionnelle entre les différents indices du modèle et la teneur du sol en calcaire. En outre, toutes les données ont été soumises à l'analyse de variance (ANOVA). Analyse statistique a été réalisée à l'aide du logiciel Statistica de Statsoft, 10^{ème} édition.

II.2.3.2. Phase II: Etude de l'amélioration de l'efficience phosphorique dans les sols calcaires

À l'heure actuelle, la fertilisation phosphatée dans les sols riches en calcaire reste non maîtrisable. Par conséquent, il est urgent de faire évoluer la gestion de toutes les pratiques agricoles, y compris la fertilisation vers des pratiques durables, intégrant mieux les processus écologiques, et favorisant à la fois une production de qualité et le maintien de la productivité des sols sur le long terme. Cela implique notamment de développer les solutions pour avoir une meilleure fertilisation de productions agricoles. De nombreuses études ont signalé une inhibition de la sorption de P (adsorption et précipitation) suite à l'usage des acides organiques (Uburger et *al.*, 2011), fumier et engrais verts (Alamgir et *al.*, 2012) et bioslids (Pinerio et *al.*, 2009), mais on ne connaît pas suffisamment les effets de certaines substances organiques comme l'extrait du fumier (jus) et des acides organiques sur la disponibilité de sol P et son fixation dans les sols. Compte tenu des faits décrits ci-dessus, les principaux objectifs de cette étude étaient pour :

- Evaluer l'effet de l'application combinée de phosphore et acides organiques de faible poids moléculaire sur certains paramètres chimiques du sol qui régissent la disponibilité P et la force de sorption de cet élément.
- Etudier la réponse du blé à une application combinée d'engrais phosphaté avec des composés organiques sur la biomasse produite, les prélèvements de P et l'efficacité d'utilisation de cet élément dans des conditions calcaires.
- Proposer des solutions pour économiser l'utilisation abusive des engrais phosphatés donc, contribue à la production agricole durable dans les sols riches en calcaire. Pour atteindre les objectifs décrits ci-dessus, nous avons réalisé deux études

complémentaires à savoir :

i. Effets des AOFPM sur la sorption de phosphore des sols calcaires

Le matériel de l'essai est constitué de :

- Sols: les deux sols S-I et S-II.
- Deux niveaux de doses du calcaire ont été employés à savoir : traitements sans apport (témoin), et des traitements fortement calcaires (à 50% de CaCO_3).
- Phosphore : il a été apporté sous forme de KH_2PO_4 (Hydrogéo-phosphate de potassium), pris comme source du phosphore dans la première expérimentation d'incubation.
- Acides organiques utilisés sont :
 - ✓ Une solution à base d'acide citrique : Dans notre cas, On a préparé une solution de 0,01M. Cette solution est caractérisée par son pH acide qui est de l'ordre de 2,47 et une conductivité électrique de 0,87 dS m^{-1} .
 - ✓ Une solution à base d'acide oxalique : On a préparé une solution de 0,01M. Cette solution est caractérisée par son pH acide qui est de l'ordre de 2,24 et une conductivité électrique de 3,38 dS m^{-1} .
- Vases de végétation en pots de plastique sous forme cylindrique d'une capacité de 200 g sont utilisés.

La démarche expérimentale passe par les phases suivantes :

- **Préparation des mélanges sol-calcaire :** Afin d'apprécier mieux l'effet des acides organiques qui font l'objet de cette étude. Les échantillons des sols, séchés à l'air libre sont bien mélangés avec le calcaire (CaCO_3) ; des traitements fortement calcaires ont été préparés S-I₅₀ et S-II₅₀ (sols avec 50 % de CaCO_3). Un kilo de chaque traitement a été pris dans des seaux en plastique et mouillé avec de l'eau distillée pour atteindre la capacité au champ et équilibré pendant 15 jours dans l'obscurité à 25°C. Tous les traitements sont maintenus à 80% de leurs capacités au champ tout au long de l'expérimentation par des apports d'eau. À la fin de l'incubation, les traitements ont été mélangés, séchés et passés à travers un tamis de 2 mm et stockés dans des bouteilles en plastique pour l'utilisation dans les études d'adsorption.
- **Etude de la sorption de phosphore en présence des acides organiques :** Pour étude de sorption, 4 g de sol a été mis dans des tubes à centrifuger de 50 mL, puis 40 mL de solution de chlorure de calcium (CaCl_2) à 0.01 M contenant 0, 10, 20, 30, 50 et 100 $\mu\text{g P}$

mL⁻¹ comme KH₂PO₄ et 10 mM kg⁻¹ sol de l'acide organique a été ajouté à chaque tube. Dans cette étude, les deux acides organiques choisis sont l'acide citrique et l'acide oxalique, ces derniers ont été choisis en raison de leur présence naturelle répandue dans les sols. La concentration appliquée d'acides organiques a été choisie en se référant sur leur concentration dans la rhizosphère, tel que rapporté par Li *et al.* (2010), et les valeurs d'acides carboxyliques dans le sol extraits par Strobel (2001). En outre, Gerke *et al.* (2000) ont signalé qu'au-dessous d'une concentration de 10 mM kg⁻¹ sol, la solubilité de P n'a pas sensiblement augmentée par l'addition d'acide citrique. Certaines caractéristiques chimiques de ces acides organiques sont présentées dans le tableau II-2. Dans chaque tube, quelques gouttes de toluène sont ajoutées pour inhiber l'activité microbienne et les tubes sont incubés à 25° C pendant une semaine avec une agitation quotidienne de 2 heures. À la fin de la période d'incubation, les tubes sont centrifugés à 4000 tr min⁻¹ pendant 10 minutes et le mélange est filtré. La teneur en phosphore dans le surnageant a été mesurée par spectrophotométrie à l'aide de spectrophotomètre Jenway-6310 à une longueur d'onde de 882 nm par la méthode de coloration bleue à l'acide ascorbique-molybdate d'ammonium (Murphy et Riley, 1962). Phosphore qui a disparu du surnageant était considéré comme adsorbé.

Tableau II-2 : Quelques caractéristiques des acides organiques utilisés

Paramètres	Solution de 0,01M	
	AC	AO
pH	2,74	2,24
Conductivité électrique, dS m ⁻¹	0,87	3,38
Carbone organique, %	37,7	33

AC : Acide citrique; AO : Acide oxalique.

- **Incubation avec les acides organiques :** Pour étudier l'effet des acides citriques et oxalique sur certains paramètres chimiques du sol régissant la force de sorption P et le comportement de P, une expérience d'incubation a été entrepris. Cinquante grammes (50 g) de chaque sol (sols avec 50 % de CaCO₃) ont été prises et mises dans des pots en plastique. Pour chaque échantillon, l'acide citrique ou l'acide oxalique a été ajoutée avec une concentration de 10 mmol kg⁻¹ sol. Dans ce cas, tous les pots sont irrigués avec un apport de 15 mL d'eau distillée ou bien 15 mL d'une solution d'acide organique, contenant 10 mmol kg⁻¹ sol pour fournir des traitements suivants : (i) témoin, eau distillée seulement (S-I_{Témoin} et S-II_{Témoin}), (ii) sols traités avec l'acide citrique (S-I_{AC} et S-II_{AC}), (iii) sols

traités avec l'acide oxalique (S-I_{AO} et S-II_{AO}). Les pots ont été disposés avec un dispositif expérimental en blocs aléatoires complet avec quatre répétitions et incubés à une température de 25±2 °C pour une période de 30 jours. L'humidité dans tous pots est maintenue à 80 % de la capacité au champ. À la fin de la période d'incubation, les échantillons de sol ont été séchés à l'air libre puis tamiser à 2 mm avant l'analyse. Le pH du sol, Ca²⁺ et phosphore soluble ont été déterminées dans 0,01 M KCl (1:10), comme décrit par Black (1980). Le phosphore assimilable (Olsen-P), a été extrait avec 0,5 M NaHCO₃ (1:20) après 30 min d'agitation et la concentration en P a été mesurée en utilisant la méthode de coloration bleue à l'acide ascorbique-molybdate d'ammonium (Murphy et Riley, 1962).

• **Mesure des paramètres de l'expérimentation** : plusieurs paramètres ont été mesurés, à savoir :

- La quantité de phosphore adsorbée pour les différents traitements (Q) a été calculée par l'équation suivante :

$$Q = \frac{V \times \Delta C}{M}$$

Où : Q = La quantité adsorbée (µg g⁻¹), ΔC = La différence entre la concentration initiale et finale (à l'équilibre) de phosphate dans le surnageant (mg P L⁻¹), V = Le volume de la solution d'équilibre (40 mL), M = la masse du sol (4 g).

- Dans notre cas, l'isotherme d'adsorption a été modulée par la forme simplifiée de Freundlich comme suit :

$$X = a \times C^n$$

Où : X = La quantité de phosphore adsorbé par gramme de sol (µg P g⁻¹ de sol), C = La concentration de P dans la solution de l'équilibre (mg L⁻¹), (a) = Constante liée à la capacité de sorption (µg g⁻¹), et n = L'énergie de sorption de phosphate (mL g⁻¹). Les paramètres (a) et (n) ont été estimés par la régression de la forme logarithmique des données obtenues par l'isotherme de sorption.

- Les exigences externes en phosphore (EPR) calculés par la forme linéaire du modèle de Freundlich comme suit :

$$EPR_{0.2} = 10 \log X \quad \text{Où : } \log X = \log a + n \times \log C$$

- Le K_{oc}, coefficient de partage carbone organique/eau, donne une indication sur l'aptitude de la molécule à être adsorbée ou désorbée sur la matière organique. Il

a été calculés par la formule suivante (Raturi et al., 2004) :

$$K_{OC} = a \times \frac{100}{SOC}$$

Où : a = Constante liée à la capacité de sorption ou bien la quantité du P adsorbé ($\mu\text{g g}^{-1}$). SOC = La teneur en carbone organique du sol (%).

- La variation d'énergie libre pour l'adsorption du phosphore a été calculée comme suit (Kim et Feagley, 1998) :

$$\Delta G = -RT \times \ln(K_{OC})$$

Où : ΔG = Energie libre de Gibbs (*Gibbs free energy*) (KJ mol^{-1}) ; R = La constante universelle des gaz parfaits ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) ; T = La température absolue en Kelvin (K).

- Pour expliquer la disponibilité chimique du phosphore dans la solution du sol, le potentiel de calcaire (LP) et de phosphate (PP) ont été calculés (Lindsay et Moreno, 1960).

$$LP = pCa + 2 \times pH$$

Où : $pCa = -\log_{10} [Ca^{2+}]$

$$PP = pH_2PO_4 - pH$$

Où : $pH_2PO_4 = -\log_{10} [H_2PO_4]$

- **Analyse statistique des données** : La signification des différences entre les moyens a été déterminée à l'aide analyse de variance (ANOVA) technique à un niveau de signification de 5% ($\alpha 0,05$) à l'aide du logiciel Statistica 10,0 Pl. En outre, le test de Duncan (Duncan's multiple range test), qui combine des moyens de valeurs similaires en groupes homogènes ordonnés, a été appliquée. Cette analyse permet une comparaison directe des relations entre un paramètre calculé cité ci-dessus et la sorption de phosphore par le sol.

ii. Effets des apports P-composés organiques sur le blé

Cet essai consiste à effectuer des apports combinés d'engrais phosphaté et de substances organiques pour étudier leurs effets sur l'assimilabilité du phosphore, son efficacité d'absorption et d'utilisation par le blé dans des sols calcaires.

Le matériel de l'essai utilisé est constitué de :

- Sol sélectionné pour notre travail est un sol sableux, apporté de la couche (0-30 cm) du profil N°1 ($33^{\circ}29'47''\text{N}$; $005^{\circ}39'39''\text{E}$) évoqués précédemment (S-I).
- Deux niveaux de doses du calcaire ont été employés à savoir : traitements sans

apport (témoin), et des traitements à 25% de CaCO₃ (traitements moyennement calcaires).

- Matériel végétal : dans notre expérimentation nous avons opté pour la variété Boussalem de blé dur, dont le pedigree est Heider/Martes//Huevos de Oro, est une nouvelle obtention. Elle figure parmi les génotypes en tête de classement dans les essais multi-sites rapportés par Annichiarico *et al.*, (2005). Selon l'ITGC, cette variété présente les caractéristiques technologiques suivantes : - PMG = 41g ;
- Taux de protéine = 15% ; - RDT/q/Ha \approx 40 (ITGC).
- Engrais sélectionné dans cet essai est le TSP (46% de P₂O₅) ; contenant quelques oligoéléments. C'est un engrais qui présente une très bonne solubilité et il n'agit pas sur le pH. Donc, il peut être appliqué sur une large gamme des sols y compris les sols calcaires.
- Deux acides organiques ont été utilisés qui sont :
 - ✓ Une solution à base d'acide citrique : Dans notre cas, On a préparé une solution de 0,01M. Cette solution est caractérisée par son pH acide qui est de l'ordre de 2,74 et une conductivité électrique de 0,78dS m⁻¹.
 - ✓ Une solution d'extrait du fumier de type fiente de volailles : La méthode de préparation a été inspirée des travaux menés par Weltzien (1989), Brinton *et al.* (1996) et Ingham (2002). Il s'agit de mélanger une quantité déterminée de fumier, bien broyé et tamisé, avec de l'eau, dans une proportion 1:100 et de laisser les mélanges incuber pendant cinq jours (période d'extraction) à l'air libre, dans des conteneurs facilitant l'agitation manuelle journalière du mélange pendant quelques minutes (5 à 10 minutes). A la fin de la période d'extraction, le mélange est filtré avec un tamis de 40µm, mélange doit être conservé au réfrigérateur à une température de 4 °C et quelques gouttes de toluène sont ajoutées pour inhiber les activités microbiennes. Cet extrait est caractérisé par un pH basique qui est de l'ordre de 8.2 et une conductivité électrique de 16.02 dS m⁻¹ (Tableau II-3).

Tableau II-3 : Quelques propriétés chimiques des acides organiques utilisés

Paramètres	AC (0,01M)	EF (1:100)
pH "	2,74	8,2
CE, dS m ⁻¹	0,87	16,02
Carbone organique, %	37,7	n.d
Azote total (mg L ⁻¹) "	n.d	101

n.d signifie non déterminé.

- Eau d'irrigation distillée est utilisée afin de déceler l'effet seul du calcaire et limiter les facteurs qui peuvent affecter la nutrition phosphatée de la plante (ex. salinité de l'eau d'irrigation).
- Vase de végétation en pots de plastiques d'une capacité de 1 kg sont utilisés. Ils sont d'une forme rectangulaire avec un diamètre de 10 cm. Les pots sont perforés à la base pour permettre l'aération.

La démarche expérimentale passe par les phases suivantes :

- **Préparation des mélanges sol-calcaire :** Pour cette étude, nous avons opté pour la teneur en calcaire de 25 % pour préparer des échantillons moyennement calcaires. Cette teneur nous permettra une meilleure appréciation de l'effet de combinaisons étudiées sur la disponibilité du P. En prenant en considération la teneur de minerai de calcaire en calcaire pure qui est de l'ordre de : 65,45 % et la teneur du sol en calcaire total, les teneurs en calcaire à ajouter sont calculées comme suit (Tableau II-4).

Tableau II-4 : Quantité de calcaire apporté pour avoir des traitements à 25 % CaCO₃

Quantité de sol (g)	Quantité de calcaire (g)	Poids total (g)
682,21	317,79	1000

- **Préparation des traitements sol-calcaire-engrais :** Avant de commencer, l'engrais est broyé finement (sous forme poudreuse) et tamisé. Après avoir construit l'isotherme d'adsorption du phosphore selon le modèle de Freundlich (Fig. II-7), les doses de P sont calculées pour avoir les doses suivantes : P0, P1, P2, P3 et P4 qui représentent les concentrations désirées du P dans la solution du sol pour avoir 0- 0,05- 0,10- 0,20 et 0,40 mg P L⁻¹ (Tableau II-5). Pour assurer une bonne homogénéisation, le phosphore est bien mélangé dans les mélanges et les traitements préparés sont mis dans des pots en plastique, 1 kg de chaque traitement.

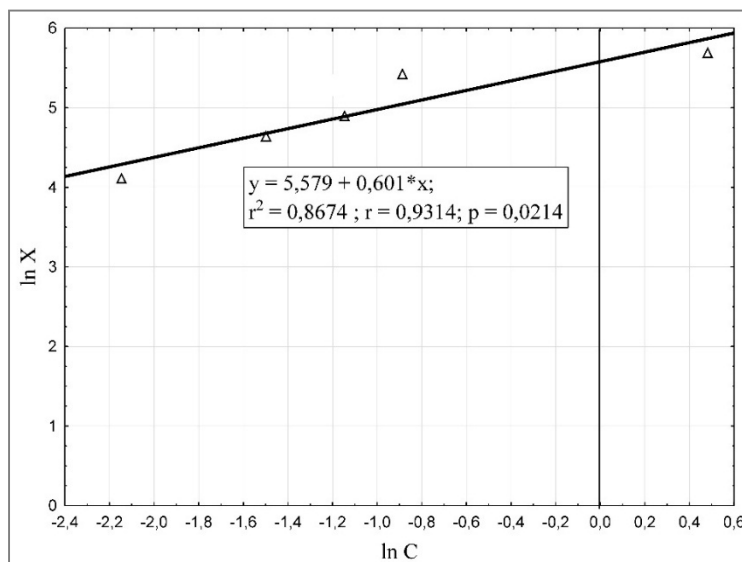


Figure II-7: Isotherme de Freundlich pour l'adsorption de P

• **Installation du dispositif expérimental :** Un dispositif expérimental de type bloc aléatoire complet est établi. L'essai comporte trois blocs expérimentaux dans lesquels les traitements sont répétés trois fois (Fig. II-8). Nous avons réalisé dans l'essai les opérations suivantes:

- ✓ Semis : il a été effectué en utilisant cinq (05) graines de blé dur (var. Boussalem) par pot. Just après la levée, le nombre de plants est réduit à deux par pot.

Tableau II-5 : Doses de phosphores testés et quantités d'engrais apportés

Equation de Freundlich	P de solution du sol (mg P L ⁻¹)	Doses de P calculées (mg P kg ⁻¹ sol)	Engrais TSP (g kg ⁻¹ de sol)
Forme linéaire	P ₀ = Témoin	0	0,000
y = 0,601x + 5,578	P ₁ = 0,05	44	0,218
Forme du modèle	P ₂ = 0,10	66	0,330
[X = aC ⁿ]	P ₃ = 0,20	101	0,501
X = 264,8C ^{0,601}	P ₄ = 0,40	153	0,760

X = Quantité du P adsorbé par g de sol (µg P g⁻¹ sol), C = Concentration de P dans la solution d'équilibre (mg L⁻¹), (a) Constant liée à la capacité de sorption (µg g⁻¹), et n est l'énergie de sorption (mL g⁻¹).

Bloc 01	P2AC	P4EF	P1ED
	P1AC	P3EF	P0ED
	P0AC	P2EF	P4ED
	P4AC	P1EF	P2ED
	P3AC	P0EF	P3ED

Bloc 02	P4AC	P2EF	P4ED
	P3AC	P1EF	P3ED
	P2AC	P0EF	P2ED
	P1AC	P4EF	P1ED
	P0AC	P3EF	P0ED

Bloc 03	P1AC	P1EF	P4ED
	P0AC	P0EF	P3ED
	P4AC	P4EF	P2ED
	P2AC	P2EF	P1ED
	P3AC	P3EF	P0ED

Figure II-8 : Dispositif expérimentale adopté (essai de blé)

- ✓ Irrigation des pots : avant la mise en culture, les pots sont irrigués pour arriver à la capacité au champ. La première irrigation est effectuée par un apport des solutions préparées : eau distillée (ED), acide citrique (AC), et extrait du fumier (EF), après ça le poids de chaque pot est marqué. Pour maintenir ce niveau d'humidité, un suivi journalier de l'humidité des pots en mesurant le poids des pots et on rajoute de l'eau distillé s'il y a une différence pour maintenir le poids initial des pots.
- **Mesures effectués et techniques d'analyse utilisées** : les prélèvements des échantillons de la plante sont effectués après 60 jours de l'essai. Simultanément, des échantillons du sol ont été prélevés et séchés à l'air libre avant l'analyse. Les paramètres analysés sont :
 - ✓ Pour le sol
 - Le phosphore assimilable (Olsen-P) a été analysé suivant la méthode Olsen (Olsen et Sommers, 1982) et le phosphore contenu dans le surnageant est extrait par la procédure de Murphy et Riley (1962).
 - Efficacité de P apporté (PPE, %) a été calculée en divisant la quantité de l'Olsen-P corrigée [P sol fertilisé - P sol témoin] par la quantité de P ajouté à chaque pot en mg kg^{-1} .
 - ✓ Pour le végétal
 - La longueur des tiges (LT, cm) : il été mesurée in-situ dans les pots et puis les tiges ont été coupées à 0,5 cm au-dessus de la surface du sol et ensuite les

racines ont été séparés du sol manuellement pour calculer la longueur des racines (LR, cm).

- La biomasse produite : les tiges de blé récolté ont été séchés à 80° C pour 72 heures et matériel végétal séchée servait à calculer le rendement en matière sèche (RMS, g pot⁻¹). Après cela, les échantillons de blé séchés ont été broyés et incinéré dans un four à moufle pendant 4 heures à 550° C.

- La concentration en P dans la plante (P_{con}, %) : Le matériel minéralisé a été dissoute dans 2 M HCl et la teneur en P est déterminée par calorimétrie à l'aide de phospho-vanadomolybdate (Sadzawka et al., 2007).

- L'exportation de phosphore (P_{exp}, mg P pot⁻¹) : elle a été calculée en multipliant la teneur en P de la plante par le rendement en matière sèche par pot (RMS).

- L'efficacité d'absorption de phosphore (EAP, mg P absorbée pot⁻¹ par mg kg⁻¹ Olsen-P) : elle a été calculée en divisant la quantité du P exporté par la quantité du P disponible dans le sol exprimé en mg kg⁻¹ (Olsen-P).

- L'efficacité de l'utilisation de phosphore (EUP, g RMS pot⁻¹ par g P exporté pot⁻¹) : elle a été calculée en divisant le RMS accumulé par pot sur la quantité du P exporté par pot. Ce paramètre exprime la quantité de matière sèche produite par unité de P absorbée (Acuña et Inostroza, 2012).

- **Analyses statistiques des données** : Les données ont été enregistrées et classés à l'aide de Microsoft Office Excel 2013. L'importance des différences entre les moyennes a été déterminée en utilisant une technique d'analyse de la variance factorielle au seuil de signification de 5 % (α 0,05) à l'aide d'un logiciel Statistica 10,0 Pl. Le test Duncan qui combine les moyens ayant des valeurs similaires en groupes homogènes a été appliqué. Une matrice de corrélation a été utilisée pour permettre une comparaison directe des relations entre certains paramètres calculés citées au-dessus.

II.2.3.3. Phase III : Etude de l'impact des acides organiques sur la dynamique d'engrais phosphaté

Cet essai a comme but d'étudier l'influence des acides organiques de faible poids moléculaire sur la capacité de fixation d'engrais phosphaté et sa cinétique dans un milieu calcaire. Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, les acides organiques sont très bénéfiques dans la mobilisation du P dans le sol grâce aux résultats très prometteurs

que l'on a trouvés. Et dans le cadre de l'amélioration de la fertilité phosphatée du sol saharien et des productions agricoles dans des conditions agro-climatique sahariennes. Nous voulons apprécier dans cette étude l'efficacité d'engrais phosphaté (MAP) conjugué avec l'application de deux différents acides organiques (acide citrique et l'acide oxalique) sur la fixation de phosphore, sa cinétique, et les valeurs résiduelles de l'application de cet engrais. Cette partie de travail a été menée parallèlement à la seconde phase et sur les mêmes échantillons de sol (0-30 cm) lors d'une expérience d'incubation sur temps courts (40 jours).

Le matériel de l'essai utilisé est constitué de :

- Sol : le sol sélectionné pour notre travail est un sol sableux, échantillonné de la couche (0-30 cm) du profil N°1 (33°29'47"N ; 005°39'39"E) (S-I).
- Engrais phosphaté: pour cette étude, il a été pris comme engrais phosphaté le MAP (Mono - Ammonium- Phosphate) : C'est un engrais phosphaté complètement soluble dans l'eau, binaire (12-52-00) riche en P (52 %) et contenant 12% d'azote sous forme ammoniacale(NH_4) H_2PO_4 . Le MAP est classé parmi les produits acidifiant (pH = 4,5) ; sa solubilité est très élevée (360 g L^{-1} à 20°C).
- Solutions d'irrigation : nous avons préparé trois solution pour les utilises au cours de notre essai sur le phosphore, à savoir :
 - ✓ Une eau distillée (ED) : comme témoin, sans apport minéral.
 - ✓ Une solution à base d'acide citrique (AC) : il y'a plusieurs recherches qui ont montré l'effet bénéfique des acides organiques, y compris l'acide citrique, sur l'amélioration du phosphore dans les sols. Dans notre cas, On a préparé une solution de 0,01M. Cette solution est caractérisée par son pH acide qui est de l'ordre de 2,74 et une conductivité électrique de 0,87 dS m^{-1} .
 - ✓ Une solution à base d'acide oxalique (AO) : On a préparé une solution de 0.01M. Cette solution est caractérisée par son pH acide qui est de l'ordre de 2,24 et une conductivité électrique de 3,38 dS m^{-1} .
- Pots : des pots en plastiques d'une capacité de 200g sont utilisés.

La démarche expérimentale consiste à une mettre en évidence de l'intérêt de l'application de quelques acides organiques sur l'amélioration de la biodisponibilité du phosphore dans les sols calcaires. La méthode adoptée est celle de l'incubation en pots avec l'utilisation de l'engrais phosphaté dont le suivi de la teneur en phosphore dans le sol

est réalisé, données qui fournissent une image sur la cinétique de phosphore assimilable dans le sol, image imparfaite dans la mesure. Par l'analyse de ce paramètre, il est possible de mesurer taux d'immobilisation de cet élément avec le temps. L'expérimentation passe par plusieurs phases, comme suit :

- **Préparation des mélanges sol-calcaire-engrais P :** pour cette étude, on a opté pour la teneur en calcaire de 50 % qui représente une teneur élevée des sols calcaires en CaCO_3 . Cette teneur nous permettra une meilleure appréciation de l'effet des acides organiques étudiées sur la disponibilité du P. En prenant en considération la teneur de minerai de calcaire en calcaire pure de 65,45 % et la teneur de sol en calcaire total. Pour avoir 1 kg de chaque mélange qui sera mis en pots, les teneurs en calcaire à ajouter sont estimés par calcul (Tableau II-6).

Tableau II-6 : Quantité de calcaire apporté pour avoir des traitements à 50 % CaCO_3

Quantité de sol (g)	Quantité de calcaire (g)	Poids total (g)
300,23	699,77	1000

Avant de commencer l'engrais choisi doit être : broyé et tamisé finement (sous forme poudreuse). Pour assurer une bonne homogénéisation. Les doses de phosphores doivent être bien mélangées dans les mélanges. Les doses sont calculées à partir des isothermes d'adsorption selon le modèle de Freundlich (voir chapitre IV). Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau II-7. Les traitements préparés sont mis dans un pot en plastique (gobelets jetables) 50 g de chaque traitement (sol-calcaire-P), comme illustré dans le dispositif expérimental.

Tableau II-7 : Teneurs initiales en phosphore assimilable (Olsen) et quantité d'engrais ajoutée pour différents traitements

Traitements	EPR _{0.2} (mg kg ⁻¹)	MAP (g kg ⁻¹ sol)
Sans apport (P0)	00,00	0,000
Témoin (P1)	57,41	0,253
50 % calcaire (P2)	105,81	0,466

EPR_{0.2} : Besoins en phosphore qui permet un bon développement de la plupart des espèces cultivées (Bolland, 2006). Les doses apportées sont calculées à partir des isothermes d'adsorption (modèle de Freundlich) discuté dans la première étude.

- **Dispositif expérimental :** Nous avons installé les traitements des pots dans un dispositif expérimental de type bloc aléatoire complet. Il est composé des traitements suivant. Le dispositif renferme deux blocs dans lesquels les trois traitements Témoin, MAP sont

répétés chacun deux fois selon le nombre des prélèvements (soit un nombre de 24 pots à enlever et analyser chaque 10 jrs) (Fig. II-9).

Calcaire apporté (%)		Sol témoin						MAP					
		P0			P0			P1			P2		
		0			50			0			50		
1 ^{er} Prélèvement (10 jrs d'incubation)	R1	ED	AC	AO	ED	AC	AO	ED	AC	AO	ED	AC	AO
	R2	AO	ED	AC	AO	ED	AC	AO	ED	AC	AO	ED	AC
2 ^{ème} Prélèvement (20 jrs d'incubation)	R1	ED	AC	AO	ED	AC	AO	ED	AC	AO	ED	AC	AO
	R2	AO	ED	AC	AO	ED	AC	AO	ED	AC	AO	ED	AC
3 ^{ème} Prélèvement (30 jrs d'incubation)	R1	ED	AC	AO	ED	AC	AO	ED	AC	AO	ED	AC	AO
	R2	AO	ED	AC	AO	ED	AC	AO	ED	AC	AO	ED	AC
4 ^{ème} Prélèvement (40 jrs d'incubation)	R1	ED	AC	AO	ED	AC	AO	ED	AC	AO	ED	AC	AO
	R2	AO	ED	AC	AO	ED	AC	AO	ED	AC	AO	ED	AC

ED, AC et AO : Désignent des traitements irrigués par l'eau distillée, par les solutions d'acide citrique et oxalique, respectivement.

P0 : Traitements non fertilisés.

P1 et P2 : Traitements fertilisés par le MAP, les doses de P sont calculés à partir des isothermes d'adsorption (Voir chapitre IV).

Figure II-9 : Dispositif expérimental adopté (essai en sol nu)

- **Irrigation des pots :** Les pots sont irrigués par les solutions préparées (à base d'acide citrique et oxalique) ; 15 mL pot⁻¹ de chaque solution. Marquer le poids de chaque pot. Après ça, tous les pots ont été maintenus au 2/3 de leur humidité équivalente par de l'eau distillée d'irrigation et aussi grâce au période, qui nous a permis donc d'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.
- **Prélèvements des échantillons :** Le prélèvement des échantillons s'est fait par le principe de sacrifices (élimination d'un groupe de traitements après chaque 10 jour d'incubation). L'essai renferme au total un nombre de 96 pots. Le prélèvement des échantillons du sol est réalisé périodiquement chaque 10 jour par une élimination de 24 pots par traitement (Témoin et MAP) et par bloc. Les sols des pots éliminés sont à analyser individuellement après séchage à l'air libre.
- **Mesures effectués et techniques d'analyse utilisées**
 - Le phosphore assimilable (Olsen-P) : il a été analysé (après 10, 20, 30 et 40 jours d'incubation) suivant la méthode Olsen (Olsen et Sommers, 1982) et le phosphore contenu dans le surnageant est extrait par la procédure de Murphy et Riley (1962).

- Le phosphore soluble : il a été analysé (après 20 jours d'incubation) suivant la méthode décrit par Black (1980) dans laquelle les échantillons du sol sont mélangés pendant 15 min avec le KCl (0,01M) dans un rapport prise d'essai : volume d'extraction (m:v = 1:10), puis incubé à 25°C pour 15h, après cela la suspension est filtrée puis le phosphore soluble est déterminé.
- La cinétique du phosphore dans le sol : elle a été effectuée en utilisant le model parabolique de diffusion suivant ($Q_t = Q_e + R\sqrt{t}$) Avec :

Q_t : Quantité de phosphore assimilable extractible avec un temps t (mg P kg⁻¹);

Q_e : Quantité de phosphore libéré en atteignant l'équilibre (mg kg⁻¹);

R : Constante de taux de diffusion du phosphore (mg P kg⁻¹ h^{-1/2}).

• **Analyse statistique des données** Les données collectées de l'expérimentation ont été enregistrées et classées à l'aide de Microsoft Office Excel 2013. Les résultats obtenus ont fait objet à une analyse factorielle de la variance au seuil de signification de 5 % (α 0,05), ainsi qu'une étude de corrélation à l'aide d'un logiciel STATISTICA 10,0 Pl. Le test de DUNCAN'S à un seuil de 5 % a été utilisé pour comparer les moyennes des variables étudiées afin de déterminer les groupes homogènes quand il existe une différence significative entre les traitements."

CARACTÉRISTIQUES DES SOLS ÉTUDIÉS

III

Les sols alluvionnaires calcaires choisis dans la région de l'Oued Righ et échantillonnés pour la réalisation de nos expérimentations, appartiennent à deux sites : Site N°1 (S-I) et Site N°2 (S-II) discutés au-dessus. Ils présentent des caractéristiques morphologiques de profils pédologiques différentes.

III.1. Caractéristiques morphologiques des sols étudiés

III.1.1. Description morphologiques du profil S-I

- **Localisation** : A droite de la route de Djamaa à M'Rara.
- **Coordonnées géographiques** : Latitude : 33°29'47"N ; Longitude : 005°39'39"E.
- **Topographie** : Plane avec une légère pente.
- **Etat de surface** : A croûte de battance avec un taux de recouvrement faible (15 à 20 %) d'une charge grossière caillouteuse de nature calcaire.
- **Temps** : Ciel couvert avec quelques gouttes de pluies.



- A (0-36 cm) de couleur rouge claire à l'état humide (2,5 YR 5/8), sec, sableuse, à structure particulaire fondue, compacte, grande charge grossière sédimentaire de nature calcaire, présence de traces des racines mortes, très forte effervescence à l'HCl, présence de nodule calcaire, transition nette avec une limite régulière.
- C1 (36-48 cm) de couleur rouge foncé à l'état humide (2,5 YR 5/6), sec, sablo-limoneuse, friable, à structure particulaire fondue, faible effervescence à l'HCl, transition distincte et limite régulière.
- C2 (48-62 cm) de couleur rouge claire à l'état humide (2,5 YR 5/8), sec, sablo-

limoneuse, très dure, à structure massive, compacte, très forte effervescence à l'HCl, charge importante de nodules et d'amas calcaire de différentes tailles, limite régulière.

- C3 (62-98 cm) de couleur rouge foncé à l'état humide (*2,5 YR 5/6*), sec, limono-argileuse, peu compacte, à structure particulière fondue, présence des strates sédimentaires très fines d'origine argileuse, faible effervescence à l'HCl.

Quant à la classification du sol, ce profil présente un sol minéraux bruts d'apport alluvial (CPCS) ou bien un fluvisol yermique (WRB-FAO).

III.1.2. Description morphologiques du profil S-II

Localisation : A droite de la route qui mène Touggourt à Bildet Amor.

Coordonnées géographiques : Latitude : 32°56'26"N ;
Longitude : 005°28'18"E.

Topographie : Surface sensiblement plane dans un glacis colluvial.

Etat de surface : Caillouteux avec un voile éolien.

Temps : Ensoleillé.



- A (0-14 cm) cm de couleur rose à l'état humide (*7,5 YR 7/4*), sec, sableuse, structure particulière, friable, forte effervescence à l'HCl surtout en surface du sol.
- C1 (14-47 cm) de couleur jaune rougeâtre à l'état humide (*7,5 YR 6/6*), sec, structure massive, pas d'effervescence à l'HCl, pas des traces d'activité biologique, transition diffuse à limite irrégulière ;
- C2 (47-119 cm) de couleur brun foncé à l'état humide (*7,5 RY 5/8*), sec, structure massive (croute calcaire), très dure, très forte effervescence à l'HCl, existence de nombreux taches noire très abondantes (racine morts), des pores vésiculaires peu fréquents.

Quant à la classification du sol, ce profil présente un sol peu évolué non climatique d'apport alluvial (CPCS) ou bien un fluvisol calcarique (WRB-FAO).

III.2. Descriptions analytiques des sols étudiés

Les échantillons des sols ont été collectés à partir de la couche superficielle du sol

(0-30 cm). Certaines propriétés chimiques et physiques des sols étudiés sélectionnés figurent au tableau III-1.

Tableau III-1 : Quelques caractéristiques physico-chimiques des sols étudiés

Propriétés	Unité	Valeur	
		S-I	S-II
Sable	%	81,32	47,85
Limon	%	13,25	40
Argile	%	5,43	12,15
USDA texture	—	Loamy sand	Loam
pH-H ₂ O	—	8,8	8,4
CE	dS m ⁻¹	0,407	3,82
CaCO ₃	%	4,2	8,05
Matière organique	%	0,87	4,45
P assimilable	mg kg ⁻¹	1,48	1,30
P soluble (CaCl ₂ -P)	mg kg ⁻¹	0,100	0,152

Valeurs représentent la moyenne de trois mesures ; CaCl₂-P (P soluble) extrait avec 0,01 M CaCl₂

Les sols sont généralement différents dans la classe de texture. La variation dans la texture reflète les différences dans les matériaux parentaux (Enwezor et *al.*, 1990). Les sols étudiés étaient légèrement alcalins en réaction, où les valeurs de pH mesurées étaient supérieures à 8. La teneur en carbonate de calcium a varié de 4,2 % (S-I) à 8,05 % (S-II), indiquant la nature calcaire des deux sols. Les sols ont été différents dans la teneur en matière organique et pauvres en phosphore assimilable (Nisar et *al.*, 1991).

ÉTUDE DE L'ADSORPTION DU PHOSPHORE DANS LES SOLS CALCAIRES

IV

IV.1. Construction des isothermes d'adsorption

Les quantités de phosphore retenues par les différents types sols (X en mg P kg^{-1} de sol) correspondent aux différences des concentrations en P des solutions initiales (C_{pi} en mg L^{-1}) et après une semaine avec une agitation quotidienne de 2 heures (C_{pe} en mg L^{-1}). On a déterminé les isothermes d'adsorption de phosphate des sols étudiés (Tableau IV-1). Les isothermes d'adsorption de phosphate de deux types de sols ont été réalisées le tracer des concentrations du phosphate à l'équilibre contre les quantités de phosphate adsorbé. D'après les données obtenues, la quantité du P retenu ainsi que la concentration du P dans la solution à l'équilibre ont été augmentés régulièrement avec l'accroissement de la dose du P qu'on a apportée. Les isothermes de rétention du P par les sols étudiés présentent un aspect hyperbolique, dont les quantités du P retenu augmentent avec la teneur des sols en CaCO_3 . Cette tendance pourrait être expliquée par des réactions d'adsorption et de précipitation qui auront lieu suite à l'addition du calcaire aux sols. Holfford et Mattingly (1975) ont rapporté que la rétention du P par les sols est dominée par le mécanisme d'adsorption pour les C_{pi} inférieures à 10^{-3} M (31 mg P L^{-1}) et que pour des C_{pi} supérieures à cette valeur, il y a une précipitation. L'affinité de rétention du P par les sols est très élevée pour les faibles C_{pi} dont plus de 90% de P en solution est retenu par les sols. En effet, la quantité du P restant en solution après l'équilibre a diminué sous l'effet du calcaire apporté. Cela signifie que les sols contenant plus de calcaire ont une grande affinité à retenir le phosphore apporté.

Tableau IV-1 : Résultats concernant l'isotherme d'adsorption du phosphore des sols étudiés

Cpi (mg L ⁻¹)	S-I						S-II					
	Témoin		25% CaCO ₃		50% CaCO ₃		Témoin		25% CaCO ₃		50% CaCO ₃	
	Cpe	X	Cpe	X	Cpe	X	Cpe	X	Cpe	X	Cpe	X
0	0,100	0,000	0,080	0,000	0,080	0,000	0,152	0,000	0,123	0,000	0,078	0,000
10	0,215	60,076	0,117	61,059	0,132	60,903	0,814	54,088	0,353	58,701	0,139	60,839
20	3,242	93,647	0,224	103,950	0,198	104,203	1,054	95,650	0,217	104,803	0,217	105,469
30	9,561	41,667	0,318	130,271	0,208	135,194	4,231	94,961	0,667	130,601	0,296	134,315
50	3,672	216,988	0,412	227,427	0,431	227,240	1,597	215,580	2,629	205,257	0,372	227,828
100	13,501	177,487	1,619	296,312	0,618	306,324	8,075	231,751	3,346	279,038	2,913	283,366

Les valeurs illustrées représentent la moyenne de quatre mesures

Cpi : Concentrations en P des solutions initiales (mg L⁻¹)

Cpe : P restant en solution (mg L⁻¹) après l'incubation

X : P adsorbé (mg kg⁻¹ sol).

IV.1.1. Modèle de Langmuir

Les valeurs de la capacité maximale d'adsorption du phosphore aux sols (X_{max}), de la constante liée à l'énergie d'adsorption du phosphore (k) et du pouvoir tampon maximum (PTM) des sols calculés à partir de la forme linéaire de l'équation de Langmuir sont données dans le tableau IV-2. Quand les données de la sorption tracés dans l'isotherme d'adsorption de Langmuir en prenant C/X contre C (Fig. IV-1), a montré un bon ajustement. La pente des équations a été trouvée plus moins de 0,01. Tandis que la valeur R^2 le plus forte était observée dans le traitement S-II₅₀ (0,96) et la plus basse était observée dans le traitement S-I₅₀ (0,24) (Tableau IV-2). Les capacités maximales d'adsorption du P aux sols ont augmenté régulièrement avec la teneur des sols en calcaire total, les valeurs obtenues varient entre 128 à 909 mg kg⁻¹ sol (S-I) et entre 140 à 1111 mg kg⁻¹ sol (S-II). L'affinité de rétention du P par les sols (= Energie de sorption) varie de 0,35 à 1,65 L mg⁻¹.

Tableau IV-2 : Les paramètres de la sorption du phosphore dans les sols calculés par l'isotherme de Langmuir

Sols & traitements	X_{max}	k	PTM	Coefficient de détermination (R^2)
S-I _{témoin}	128,21	0,72	92,3	0,44 ^{ns}
S-I ₂₅	1000	0,35	350,0	0,84 [*]
S-I ₅₀	909,1	0,5	454,6	0,24 ^{ns}
S-II _{témoin}	140,85	1,65	232,4	0,58 ^{ns}
S-II ₂₅	500	0,37	185,0	0,85 [*]
S-II ₅₀	1111,1	0,8	888,9	0,96 ^{**}

Les valeurs illustrées représentent la moyenne de quatre mesures.

X_{max} : Capacité maximale d'adsorption (mg kg⁻¹).

K : Affinité de rétention du P par les sols (= Energie de sorption) (L mg⁻¹).

PTM : Pouvoir tampon maximum (= $X_{max} \times k$).

^{ns}, ^{*} et ^{**} : Non significative ; significative à $P < 0,05$; et significative à $P < 0,01$ respectivement.

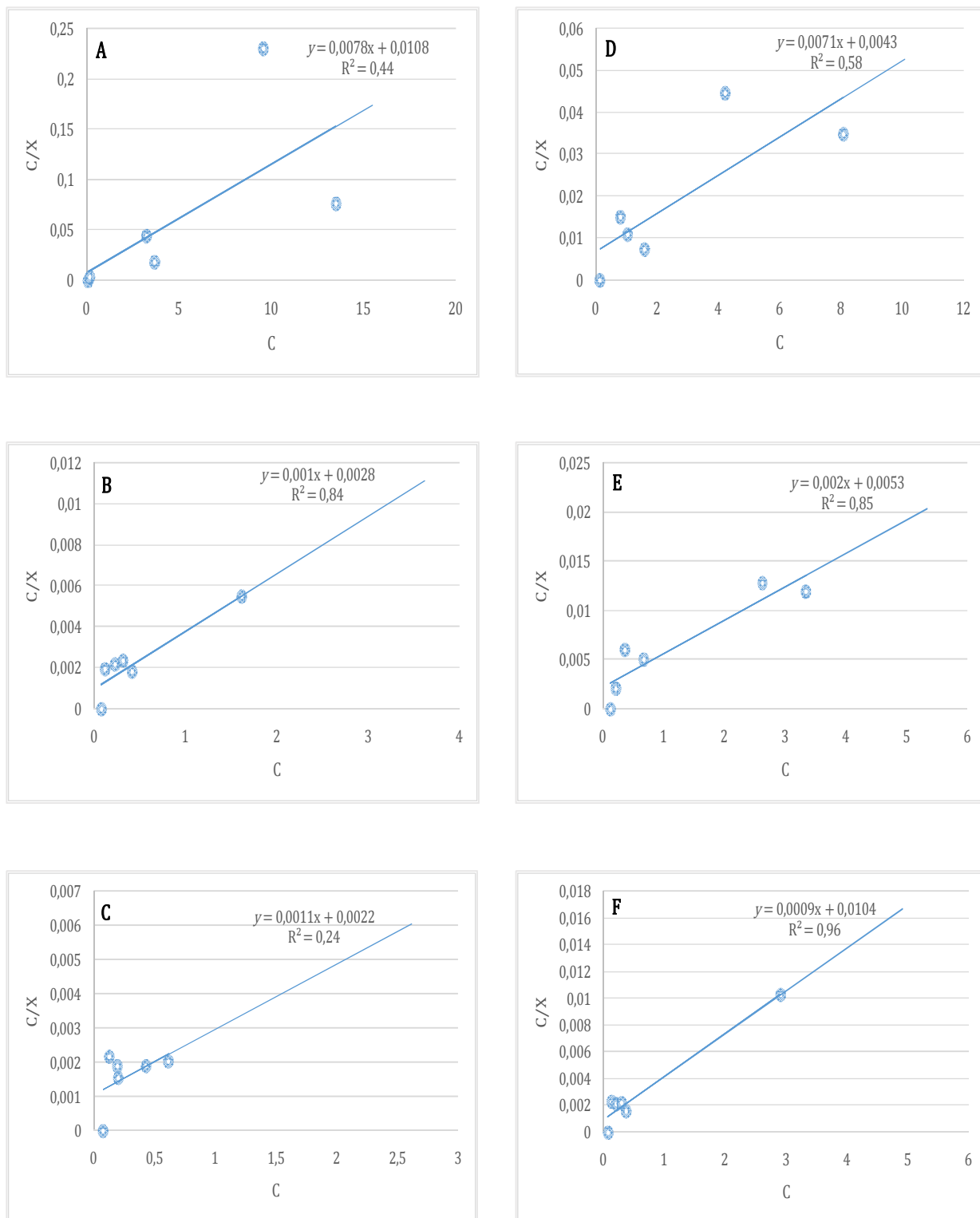


Figure IV-1 : Isothermes de Langmuir pour les sols étudiés. A, B et C désignent sol S-I témoin, avec 25 et 50% CaCO₃. D, E et F désignent sol S-II témoin, avec 25 et 50% C, respectivement.

IV.1.2. Modèle de Freundlich

Les tracés des isothermes d'adsorption du phosphore des sols étudiés sont présentés dans la figure IV-2. Les paramètres de l'équation : la capacité d'adsorption (a), l'énergie d'adsorption mL g^{-1} ainsi que les coefficients de corrélation des régressions simples des formes linéaires des isothermes d'adsorption de Freundlich et Langmuir pour les deux intervalles de concentrations initiales en phosphore ($0\text{-}100 \text{ mg P L}^{-1}$) sont présentés au tableau IV-3.

Tableau IV-3 : Les paramètres de la sorption du phosphore dans les sols calculés par l'isotherme de Freundlich

Sols & traitements	(a)	(n)	PTM	Coefficient de détermination (R^2)
S-I _{témoin}	87,88	0,265	23,3	0,59 ^{ns}
S-I ₂₅	264,81	0,601	159,2	0,86 [.]
S-I ₅₀	524,79	0,995	522,2	0,96 ^{..}
S-II _{témoin}	72,24	0,448	32,4	0,67 ^{ns}
S-II ₂₅	129,67	0,601	77,9	0,92 [.]
S-II ₅₀	719,10	1,267	911,1	0,96 ^{..}

Les valeurs illustrées représentent la moyenne de quatre mesures.

(a) : Capacité d'adsorption ($\mu\text{g g}^{-1}$ sol).

(n) : Energie d'adsorption (mL g^{-1}).

PTM : Pouvoir tampon maximum, ($= a \times n$).

^{ns}, [.] et ^{..} : Non significative ; significative à $P < 0,05$; significative à $P < 0,01$. respectivement.

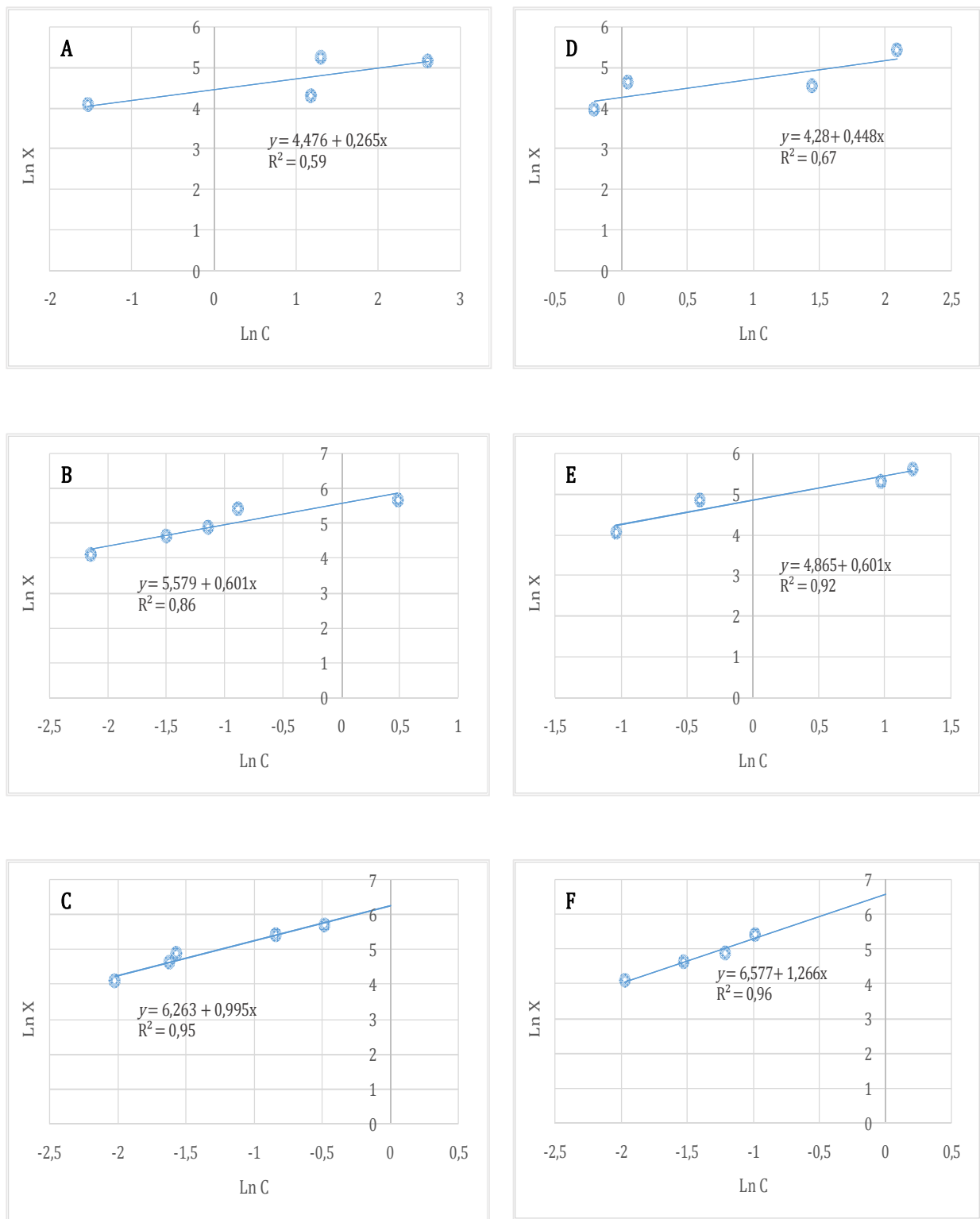


Figure IV-2 : Isothermes de Freundlich pour les sols étudiés. A, B et C désignent sol S-I témoin, avec 25 et 50% CaCO₃. D, E et F désignent sol S-II témoin, avec 25 et 50% C, respectivement.

Les capacités d'adsorption du P aux sols ont augmenté régulièrement avec l'accroissement de la teneur des sols en calcaire total, les valeurs obtenues oscillent entre 87 à 524 mg kg⁻¹ sol (S-I) et entre 72 à 719 mg kg⁻¹ sol (S-II). L'affinité de rétention du P par les sols a été proportionnelle aux teneur des sols en CaCO₃. Les valeurs obtenues varient de 0,265 à 0,995 L mg⁻¹ (S-I) et entre 0,448 à 1,267 L mg⁻¹ (S-II). La valeur la plus basse de la constante d'énergie de sorption était due à la nature alcaline du sol. Olsen et Watanabe (1957) ont rapporté 0,92 et 4,39 L mg⁻¹ dans le sol alcalin et acide, respectivement. Dans les deux modèles utilisés, le sol S-II a enregistré les plus hautes valeurs d'adsorption cela peut être dû à la teneur en argile, en CaCO₃ et au rapport Ca : P qui sont relativement plus élevé par rapport au S-I. Dans les équations d'adsorption (Fig. IV-2), les valeurs de la capacité d'adsorption des sols sont en corrélation positive avec le CaCO₃. Samadi et Gilkes (1999) et Samadi (2001) ont signalé que l'adsorption de P dans les sols calcaires était liée à CaCO₃. Un bon ajustement de l'adsorption de P données pour le modèle d'adsorption de Freundlich, Langmuir et Tempkin a également été signalé par Khan *et al.* (2010). Assimakopoulos *et al.*, (1986) a déclaré que la capacité d'adsorption (a) de Freundlich représente la quantité de phosphore adsorbé nécessaire pour maintenir la concentration de P dans la solution à une seuil de 1 mg P L⁻¹. Nos résultats rejoignent ceux obtenus par Hussain *et al.* (2003) qui ont déclaré que (a) valeur de l'isotherme de Freundlich est liée à la teneur en calcaire du sol, teneurs en argile et le pourcentage de saturation des sols. Sachant qu'une plus petite valeur de la capacité d'adsorption signifie des quantités plus élevées de phosphore biodisponible dans la solution du sol. Généralement, les valeurs minimales et maximales de (a) ont été observées dans les sols S-I et S-II, respectivement. La valeur (a) dépend de la concentration de P en solution (Kuo et Lotse, 1974), pour cette raison la valeur de (a) varie de sol à un autre. Castro et Torrent (1994) a constaté une augmentation dans l'adsorption de P avec l'augmentation des carbonates du sol et contribue à la précipitation des Ca-phosphate. Toutefois, Samadi (2006) a indiqué que le CaCO₃ total et actif ont été des facteurs moins importants pour l'adsorption de P. Dans une analyse de régression, l'énergie de sorption P (n) pour le modèle de Freundlich est en corrélation significative avec la teneur en CaCO₃ des sols, les valeurs de l'énergie de sorption (n) ont aussi augmenté avec l'augmentation de teneur en CaCO₃ des sols (tableau IV-4). Nos résultats concordent ceux obtenus par Fitter et Sutton (1975) qui a signalé que (n) de l'isotherme de Freundlich est strictement lié au calcium

dans les sols calcaires et neutres. La valeur de l'exposant (n) varié de 0,265 (S-I_{témoin}) et 1,267 (S-II₅₀) (tableau IV-4). Bhal et Toor (2002) ont déclaré que la valeur (n) du modèle de Freundlich indique le taux d'adsorption de P et la petite valeur du (n) indiquerait une réduction dans l'adsorption de P.

IV.2. Evaluation des exigences en phosphore des sols

L'évaluation de la capacité de fixation du phosphore représente un élément clé pour déterminer les besoins en engrais phosphatés dans les sols calcaires. Après avoir déterminé la capacité de fixation du phosphore par les sols étudiés, les besoins externes en phosphore (EPR) du sol peuvent être calculés à partir de l'équation de Freundlich et celle de Langmuir (Fig. IV-3). C'est une évaluation du potentiel de la sorption de P (Jackman et al., 1997 ; Wang et al., 2000). Plusieurs études ont prouvé que la quantité de P en équilibre avec 0,2 mg de P L⁻¹ (EPR_{0.2}) a montré qu'est le seuil optimum pour le développement de la plupart des cultures (Beckwith, 1965 ; Iyamuremye et al., 1996 ; Nziguheba et al., 1998). Selon l'échelle donnée par Juo et Fox (1977), les données des études de sorption P a indiqué que les deux sols étudiés ont une exigence faible à moyenne en phosphate (Tableau IV-4).

La forme linéaire de l'équation de Freundlich est utilisée pour le calcul des quantités d'engrais P nécessaires. Les besoins plus élevés de l'ordre de : 105 mg kg⁻¹ de sol (équivalent à 484 kg P₂O₅ ha⁻¹) et 93 mg kg⁻¹ de sol (équivalent à 428 kg P₂O₅ ha⁻¹) ont été obtenues respectivement par les sols : S-I et S-II ayant 50% de CaCO₃. Quant à l'équation de Langmuir les besoins estimés sont totalement différents et plus au moins faibles par rapport à ceux estimés par l'équation de Freundlich. Dans ce cas les besoins les plus forte de : 85 mg kg⁻¹ de sol (équivalent à 391 kg P₂O₅ ha⁻¹) et 51 mg kg⁻¹ de sol (équivalent à 234 kg P₂O₅ ha⁻¹) ont été enregistrés respectivement par les sols : S-I₅₀ et S-II₂₅. Des relations entre le niveau souhaité du P dans la solution du sol et P requis (mg P kg⁻¹ de sol) sont présentées dans la Figure IV-3 (a et b) à partir de lesquels, les besoins externes en phosphore (EPR) du sol à n'importe quel niveau souhaité du P dans la solution du sol pourraient être calculés. Comme indiqué dans le tableau IV-5, plusieurs corrélations positives et significatives ont été observées entre les valeurs de paramètres de sorption de P et le CaCO₃, ces relations fortes suggèrent l'importance du calcaire libre dans la sorption de phosphore et l'estimation des besoins phosphatés des sols et des cultures. Des résultats similaires ont été obtenus par (Shariatmadari et al., 2006), ils ont trouvé des relations

positives et significatives avec du carbonate de calcium actif. Il me semblait que dans nos sols, le CaCO_3 contrôle majoritairement la sorption de P ce qui affecte l'estimation des besoins en P des différentes cultures.

Tableau IV-4 : Exigences en phosphore des sols calculé à partir de la forme linéaire des isothermes de Freundlich et Langmuir afin d'établir une solution du sol avec $0,2 \text{ mg P L}^{-1}$

Traitements	<i>Modèle de Freundlich</i>			<i>Modèle de Langmuir</i>		
	EPR _{0,2} (mg kg ⁻¹ sol) ^a	P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹) ^b	Interprétation ^c	EPR _{0,2} (mg kg ⁻¹ sol) ^a	P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹) ^b	Interprétation ^c
S-I _{témoin}	57,41	262,97	Faible	16,3	74,55	Faible
S-I ₂₅	100,66	461,03	Moyen	66,7	305,33	Faible
S-I ₅₀	105,81	484,59	Moyen	85,5	391,60	Faible
S-II _{témoin}	33,36	152,81	Faible	35,4	162,32	Faible
S-II ₂₅	49,27	225,65	Faible	51,3	234,87	Faible
S-II ₅₀	93,57	428,54	Faible	45,9	210,37	Faible

^a and ^b : Exigence externe en P et en P₂O₅ pour une solution du sol contenant $0,2 \text{ mg P L}^{-1}$

^c : Selon les intervalles donnés par Juo et Fox (1977).

Tableau IV-5 : Relations entre tous les paramètres étudiés

	CaCO ₃	Pente F	Pente L	Interception F	Interception L	a	n	k	X _{max}	EPR _{0.2} (F)	EPR _{0.2} (L)	P ₂ O ₅ (F)	P ₂ O ₅ (L)
CaCO ₃	1,00												
Pente F	0,95	1,00											
Pente L	-0,08	0,02	1,00										
Interception F	0,96	0,92	0,01	1,00									
Interception L	-0,85	-0,75	0,20	-0,83	1,00								
a	0,93	0,96	0,10	0,96	-0,70	1,00							
n	0,95	1,00	0,02	0,92	-0,75	0,96	1,00						
k	-0,60	-0,50	-0,17	-0,70	0,73	-0,59	-0,50	1,00					
X _{max}	0,89	0,83	-0,10	0,95	-0,93	0,85	0,83	-0,72	1,00				
EPR _{0.2} (F)	0,77	0,66	-0,06	0,89	-0,76	0,77	0,66	-0,72	0,90	1,00			
EPR _{0.2} (L)	0,66	0,49	-0,70	0,59	-0,72	0,43	0,49	-0,28	0,66	0,63	1,00		
P ₂ O ₅ (F)	0,77	0,66	-0,06	0,89	-0,76	0,77	0,66	-0,72	0,90	1,00	0,63	1,00	
P ₂ O ₅ (L)	0,66	0,49	-0,70	0,59	-0,72	0,43	0,49	-0,28	0,66	0,63	1,00	0,63	1,00

Toutes les valeurs *en gras* sont significatives à $P < 0,01$; F : modèle de Freundlich ; L : modèle de Langmuir.

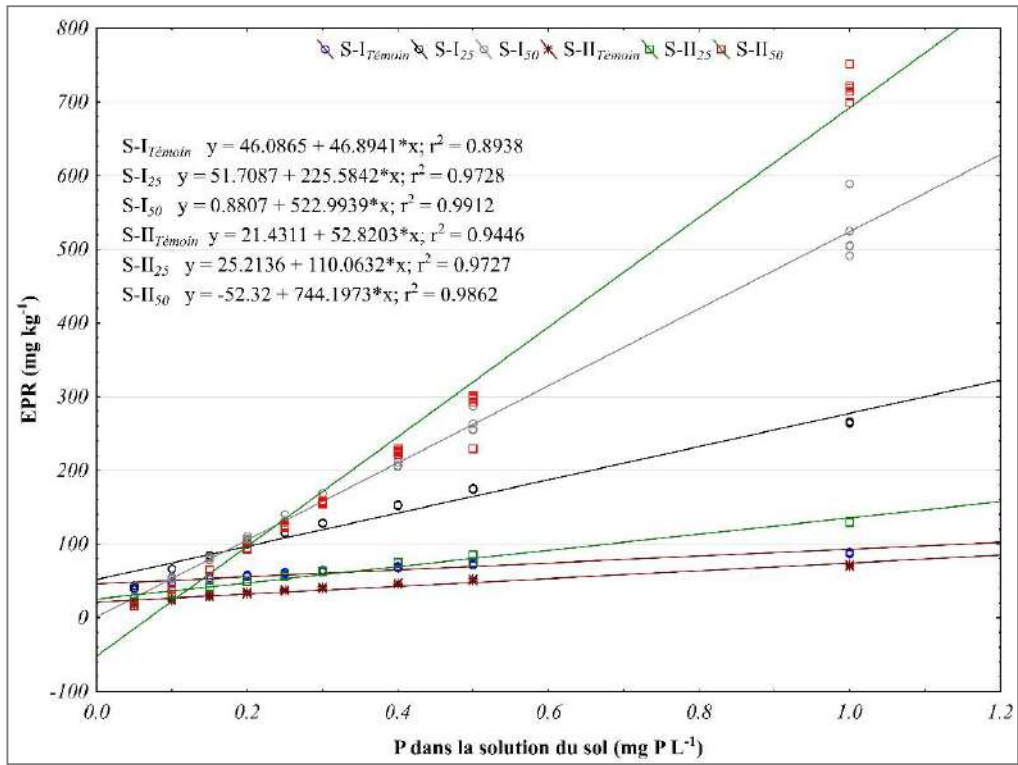


Figure IV-3a : Relation entre la concentration de la solution du sol en P et les exigences en P des sols calculés à partir de l'équation de Freundlich

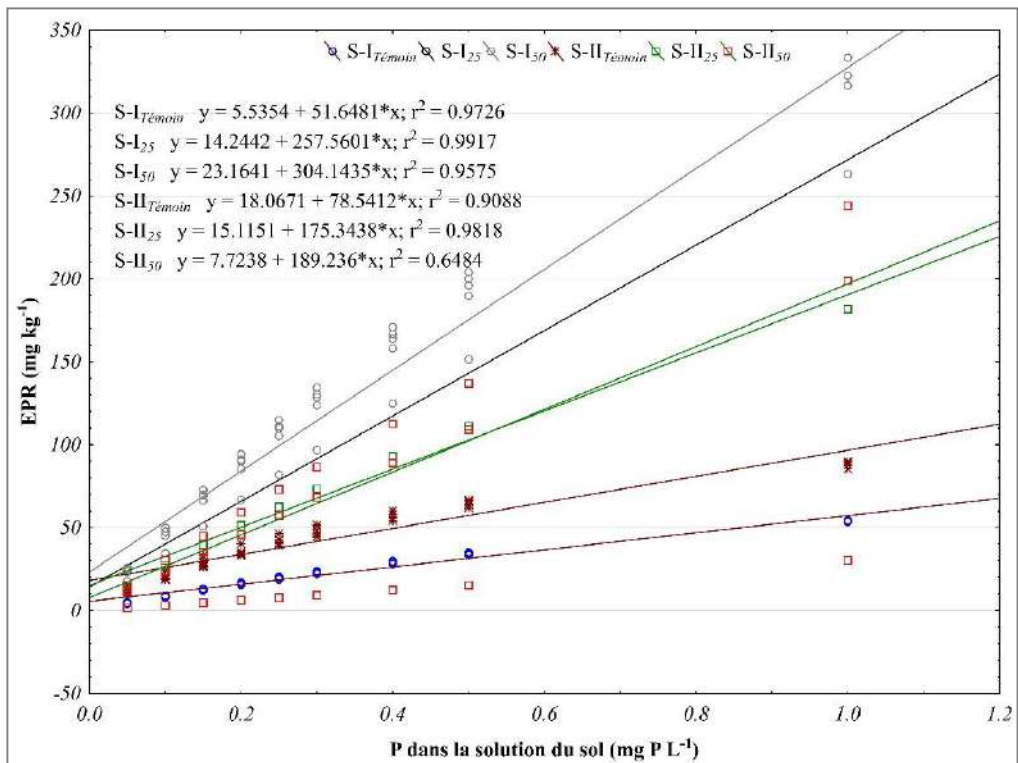


Figure IV-3b : Relation entre la concentration de la solution du sol en P et les exigences en P des sols calculés à partir de l'équation de Langmuir

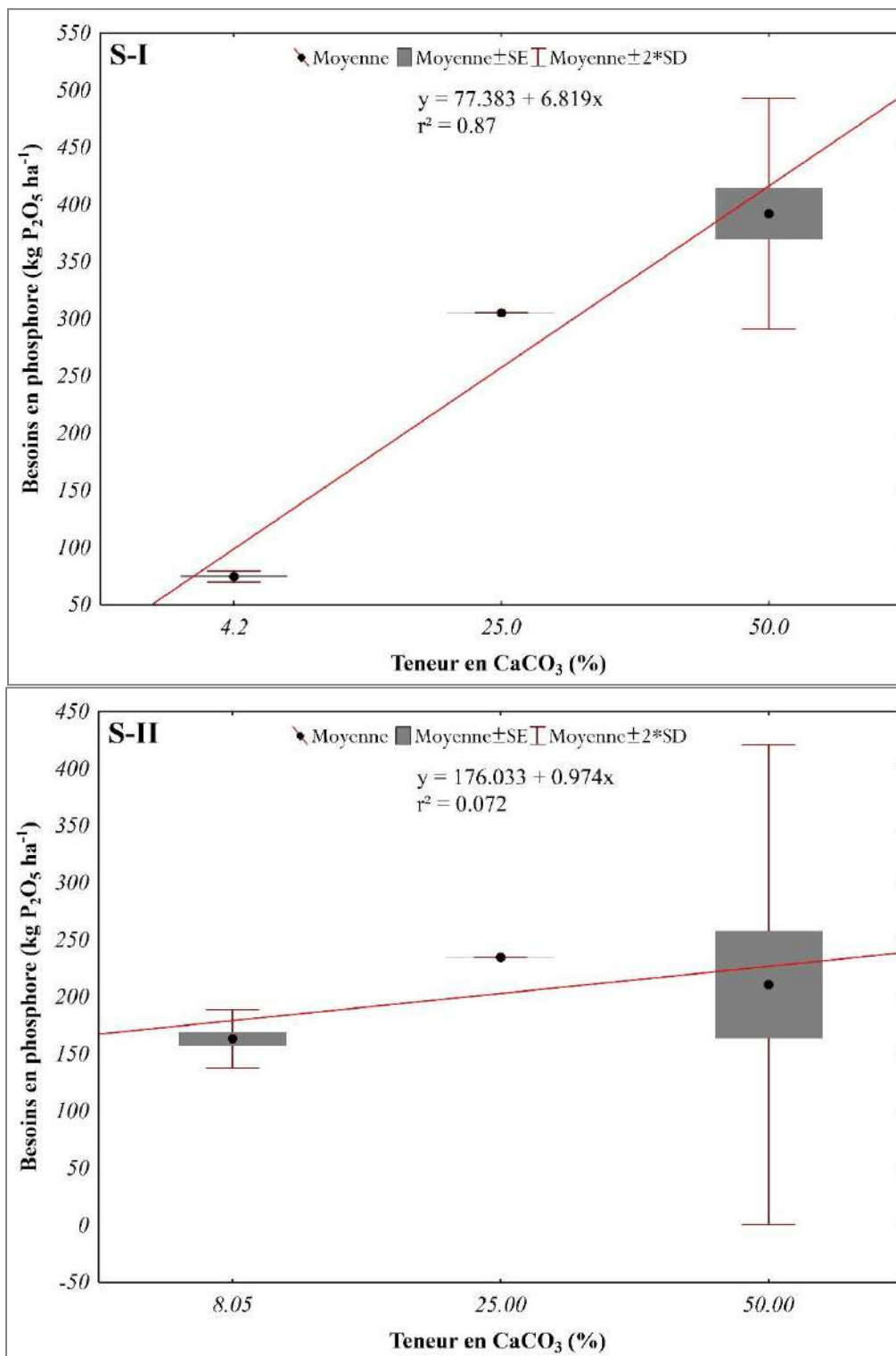


Figure IV-4a : Relation entre la teneur en calcaire et les apports recommandés en phosphore calculés à partir de l'équation de Langmuir

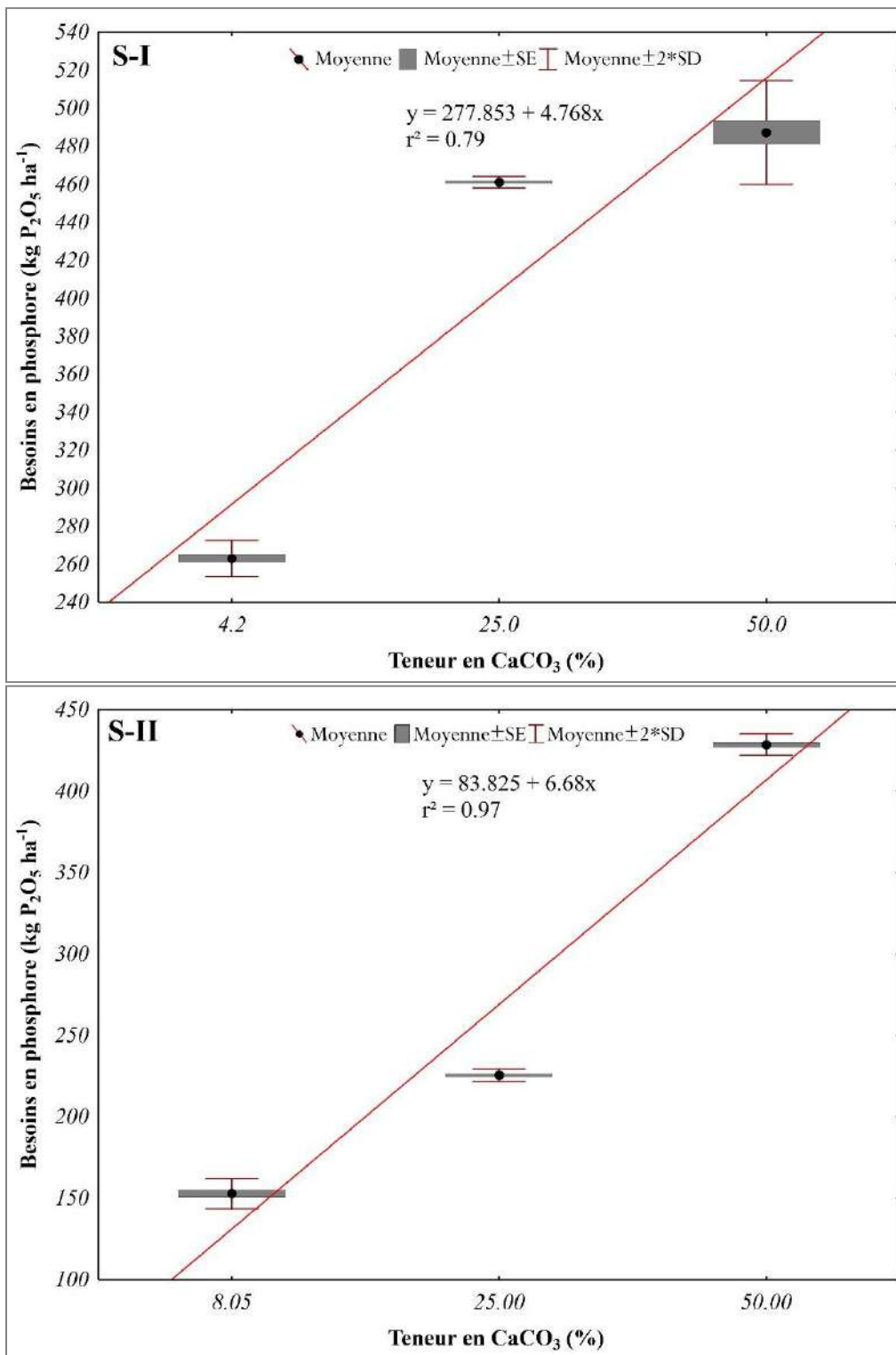


Figure IV-4b : Relation entre la teneur en calcaire et les apports recommandés en phosphore calculés à partir de l'équation de Freundlich

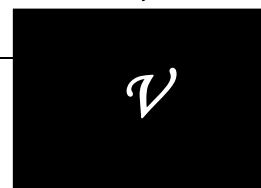
Les régressions entre teneur en CaCO_3 des sols et les exigences en P_2O_5 (kg ha^{-1}) ont été établis tels que présentés dans la figure IV-4 (a et b). En utilisant ces équations, la quantité d'engrais P requis pour n'importe quel niveau de CaCO_3 pourrait être aisément calculée. L'utilisation de l'isotherme de sorption de P, ce qui relie la concentration en P de la solution de sol avec la quantité de P adsorbée dans le sol, pour prévoir les besoins d'engrais P d'un sol spécifique est une meilleure approche plutôt que d'utiliser des analyses du sol. Mais en extrapolant les relations développées entre la teneur en calcaire des sols et la quantité d'engrais aux autres sols de texture similaires à besoin de confirmation. Si c'est vrai, alors il serait tout à fait une approche prometteuse, précise, avec un gain de temps pour prédire les besoins des sols en matière d'engrais phosphatés.

IV.3. Conclusion

Nous pouvons conclure de cette étude que l'application de l'isotherme d'adsorption du phosphore était efficace en déterminant les caractéristiques de sorption de phosphore et les besoins en phosphore des deux sols pour satisfaire les besoins phosphoriques de la plupart des cultures.

Le carbonate de calcium est considéré parmi les principaux facteurs de l'indisponibilité de P aux plantes par des réactions d'adsorption et de précipitation. Par conséquent, la fertilisation phosphatée de ces sols peut être rationalisé selon leurs teneurs en calcaire. Les isothermes d'adsorption étudiée montrent qu'un bon ajustement linéaire pour les données des deux sols étudiés a été observé et la bonté de l'ajustement du modèle a été déterminée à partir de (R^2) valeurs indiquant la grande conformité des données avec les modèles d'adsorption employés. Cela signifie que les exigences externes de P des sols pourrait mieux être déterminée en utilisant ces modèles d'adsorption plutôt que d'utiliser les autres approches classiques.

ÉTUDE DE L'AMÉLIORATION DE L'EFFICIENCE PHOSPHORIQUE DANS LES SOLS CALCAIRES



V.1. Effets des AOFPM sur la sorption de phosphore des sols calcaires

V.1.1. Effet de l'addition des acides organiques sur les indices d'adsorption de phosphore

L'isotherme d'adsorption effectuée par la forme linéaire de l'équation de Freundlich (tableau V-1). Un tracé de $\ln(x)$ (axe-y) contre $\ln(c)$ (axe-x) donne une ligne droite avec une pente (n) et une ordonnée à l'origine $\ln(a)$.

Tableau V-1 : Les paramètres de Freundlich des sols sans et avec traitement par l'acide citrique et oxalique

Traitements	Intercepte	Pente	R ²	Equation de Freundlich	
				Forme du model	Forme Linéaire
S-I ^{témoin}	6,263	0,995	0,95 ^{***}	$P = 524,8C^{0,995}$	$y = 0,995x+6,263$
S-I ^{AC}	4,124	0,165	0,40 ^{ns}	$P = 61,85C^{0,165}$	$y = 0,165x+4,124$
S-I ^{AO}	4,685	0,443	0,72 ^{**}	$P = 108,4C^{0,443}$	$y = 0,443x+4,685$
S-II ^{témoin}	5,627	0,632	0,77 ^{**}	$P = 287,86C^{0,632}$	$y = 0,632x+5,627$
S-II ^{AC}	3,423	0,501	0,42 ^{ns}	$P = 30,76C^{0,501}$	$y = 0,501x+3,423$
S-II ^{AO}	4,652	0,473	0,90 ^{***}	$P = 104,8C^{0,473}$	$y = 0,473x+4,652$

Toutes les valeurs représentent le moyen de quatre mesures

Témoin, AC et AO dénote les sols étudiés traités par l'eau distillée seulement, traités par l'acide citrique, ou traités par l'acide oxalique, respectivement.

R² : Coefficient de détermination de l'équation de Freundlich.

^{ns}, ^{**}, and ^{***}: Non significative, significative à $P < 0,01$, et significative à $P < 0,001$, respectivement.

Les paramètres de l'équation de Freundlich [capacité de sorption $\mu\text{g g}^{-1}$ (a), énergie de sorption $\text{mL g}^{-1}(n)$] sont présentées au tableau V-2. La qualité de l'adaptation du modèle a été assurée à partir des valeurs de (R²) qui indiquent une bonne conformité des données avec le modèle d'adsorption de Freundlich. Un bon ajustement des données pour le modèle d'adsorption de Freundlich a également été signalé par Khan et *al.* (2010).

Tableau V-2 : Paramètres relatifs à l'adsorption du P dans les sols sans et avec traitement par l'acide citrique et oxalique

		Traitements			F(p)
		Témoin	AC	AO	
(a) ($\mu\text{g g}^{-1}$)	S-I	524,8±48,68 ^b	61,85±0,37 ^a	108,4±1,09 ^a	6,93 (0,02)
	S-II	287,86±75,35 ^b	30,76±2,19 ^a	104,8±0,36 ^{ab}	
(n) (mL g^{-1})	S-I	0,991±0,04 ^c	0,165±0,02 ^a	0,443±0,01 ^b	8,48 (0,02)
	S-II	0,632±0,19 ^a	0,501±0,06 ^a	0,473±0,001 ^a	
K_{oc}	S-I	108071±9737,7 ^b	12369,4±73,5 ^a	21679,40±217,8 ^a	66,14 (0,00)
	S-II	11157,5±2920,6 ^b	1192,1±84,91 ^a	4062,2±13,81 ^{ab}	
ΔG (Kj mol^{-1})	S-I	-27,8±0,22 ^a	-22,6±0,014 ^c	-23,96±0,02 ^b	4,93 (0,05)
	S-II	-22,28±0,64 ^a	-16,99±0,17 ^c	-19,94±0,008 ^b	

Valeurs représentent le moyen de quatre répétitions \pm SE.

Témoin, AC et AO dénotent les sols étudiés traités par l'eau distillée seulement, par l'acide citrique, ou par l'acide oxalique, respectivement.

^{a-c} : Traitements ayant 50% CaCO_3 .

(a), (n), K_{oc} et ΔG dénotent la capacité de sorption, l'énergie de sorption, le coefficient de partage de la sorption et l'énergie libre pour l'adsorption du P, respectivement.

^{a-c} Les lettres indiquent une différence statistiquement significative entre les groupes déterminée par le test de DUNCAN ($P < 0,05$).

La sorption de phosphate a été utilisée dans notre étude pour inclure tous les processus (adsorption et précipitations) ayant pour résultat le déplacement du phosphate des solutions (Castro et Torrent, 1998). L'acide citrique et l'acide oxalique ont diminué la capacité d'adsorption de P ($\mu\text{g g}^{-1}$) des sols. Dans ce cas, les valeurs de la capacité d'adsorption enregistrée sont de l'ordre de : 61,85±0,37 à 108,4±1,09 $\mu\text{g g}^{-1}$ (S-I) et 30,76±2,19 à 104,8±0,36 $\mu\text{g g}^{-1}$ (S-II). En outre, l'énergie d'adsorption de P par les sols a enregistré aussi une tendance à la diminution suite à l'application de ces acides organiques (Tableau V-2). Les données relatives au coefficient de partage carbone organique (K_{oc}) et de l'énergie libre d'adsorption (ΔG) montrent que les valeurs maximales du K_{oc} ont enregistré dans les sols témoins. Les sols traités par les acides organiques ont donné des valeurs inférieures du K_{oc} . Selon l'équation de Freundlich, l'énergie libre de l'adsorption de P diminue si la capacité d'adsorption (a) augmente. Une augmentation de l'énergie libre d'adsorption de P a été favorisée à l'aide des acides organiques. Ceci peut être attribuer à la fraction de matière organique dans le sol qui contribue à la fixation de P en formant des complexes composés de : matière organique, cations métalliques et les phosphates. Les acides organiques de faible poids moléculaire, libérés lors de la décomposition de résidus organiques augmentent les sites P de sorption sur les cations en inhibant la polymérisation et cristallisation des cations métalliques (Wandruszka, 2006). Ces réactions peuvent se manifester par une augmentation de l'énergie libre d'adsorption

de P par les sols. Nos résultats concernant le changement de l'énergie libre de Gibbs concordent ceux obtenus par Kim et Feagly (1998). Ils ont signalé que les valeurs négatives de l'énergie libre d'adsorption suggèrent une faible adsorption physique de P, qui au fil du temps peut maximiser la réaction et la disponibilité de P dans le sol (Chattha et al., 2007). Les valeurs de l'énergie libre d'adsorption ont suivi une tendance opposée à la quantité de phosphore adsorbé ($R = -0,79$) et ces résultats concordent ceux obtenus par Chattha et al. (2007) et Mei et al. (2012) qui a également signalé une corrélation négative entre ces paramètres. Ces constatations suggèrent la grande importance de l'énergie libre d'adsorption de P dans le contrôle de la capacité de sorption de P des sols étudiés. Un effet hautement significative ($P < 0,01$) de l'addition des acides organiques sur l'adsorption de phosphate par les sols a été observée. D'après les données obtenues, les quantités du P retenus par les sols ont été augmentés régulièrement avec l'accroissement de la dose du P qu'on a apportée. Les sols témoins sans apport des acides organiques absorbent une plus grande quantité du P apporté. Tandis que la quantité du P retenu par les sols traités par ces organiques acides était très réduite (Fig. V-1). Cette remarque pourrait être expliquée par l'effet bénéfique des acides organiques qui rentrent en compétition avec les composants du sol responsable de l'adsorption du phosphore. Les capacités de sorption du phosphore dans les témoins étaient $287,86 \pm 75,35$ à $524,8 \pm 48,68 \mu\text{g g}^{-1}$ pour S-II et S-I, respectivement. Ces quantités étaient relativement trop élevées que la quantité de phosphore adsorbé dans les sols traités quel que soit l'acide organique utilisé (Fig. V-2). Assimakopoulos et al. (1986) a déclaré que quantité adsorbée (a) de la Freundlich modèle représente la quantité de phosphore adsorbé nécessaire pour maintenir une unité P de concentration dans la solution (c.-à-d. $1,0 \text{ mg P L}^{-1}$). La valeur de (a) dépende de la concentration de P en solution (Kuo et Lotse, 1974) pour cette raison, la valeur de (a) varie de sol à un autre. Une plus petite valeur de (a) indique des quantités plus élevées de phosphore biodisponible dans la solution du sol. Dans notre étude, les valeurs minimales et maximales de (a) ont été observées dans les sols traités avec les acides organiques et les sols non traités, respectivement. Les résultats ont montré que l'acide citrique était plus efficace que l'acide oxalique dans la réduction de la sorption de P.

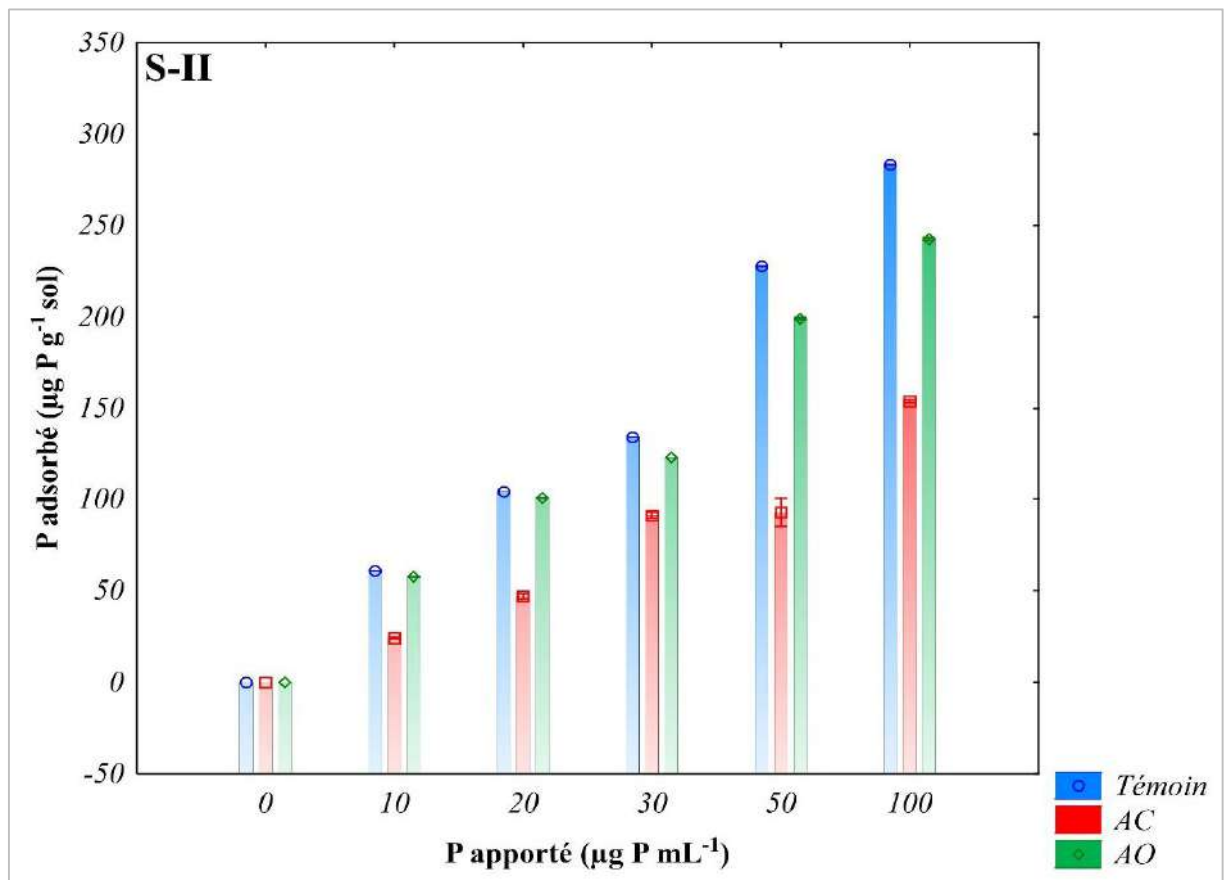
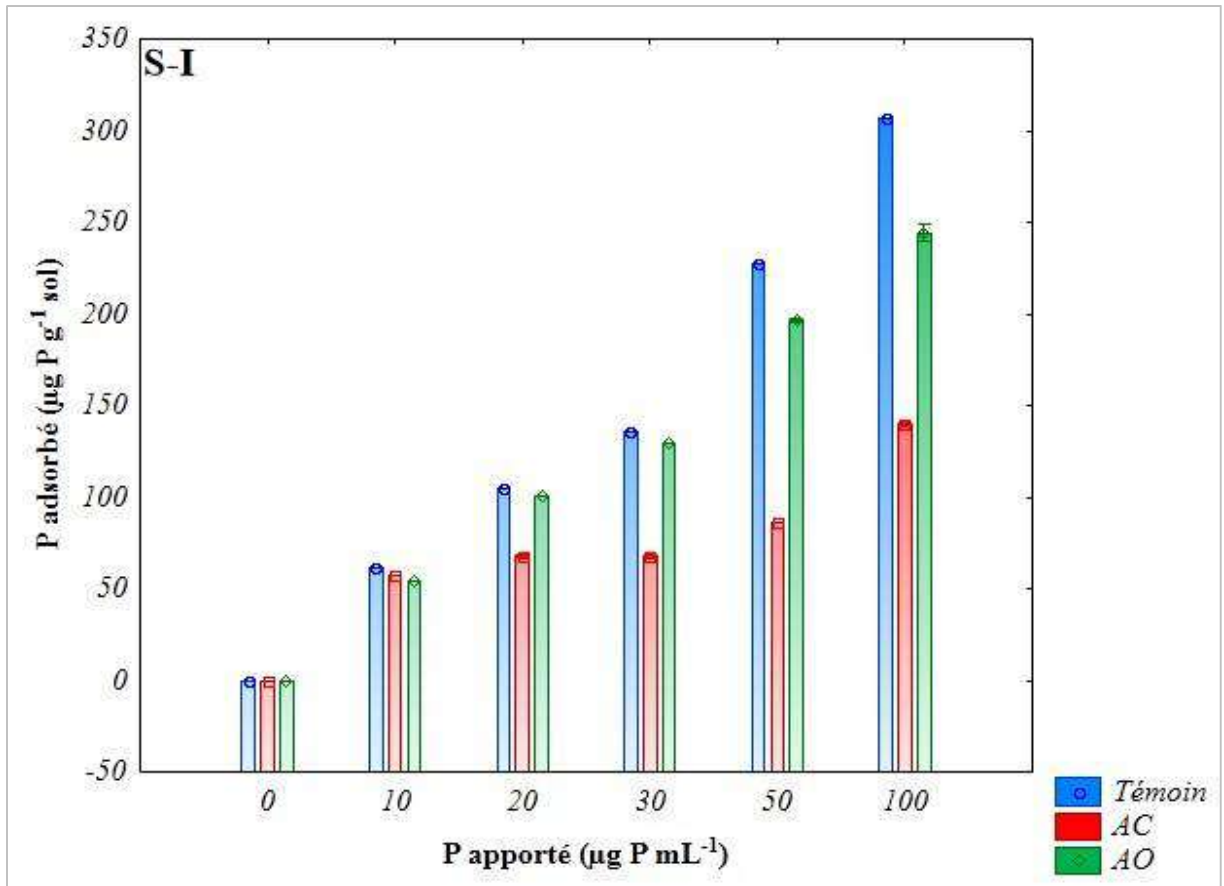


Figure. V-1 : Isothermes d'adsorption du phosphore dans les sols étudiés

La capacité des acides organiques à réduire la sorption de P semble suivre l'ordre suivant : acides citrique >acide oxalique. Cela pourrait probablement attribue aux hydroxyles acides comme les citrates qui peuvent former des complexes plus forts que ceux qui contiennent un seul groupe COOH (Tsado et *al.*, 2012). En général, dans cette étude, l'ordre des sols selon leurs capacités d'adsorption a été : S-I >S-II. Ceci peut attribuer à la teneur en matière organique du S-II (4,45 %) par rapport au S-I. La matière organique peut accroître la disponibilité de P par la production d'acides organiques ou des substances humiques ce qui concurrencent les phosphates pour les sites de sorption dans le sol, et ils produisent des complexes plus forts avec les ions Ca^{2+} qui par conséquent augmentent la teneur en P dans la solution du sol.

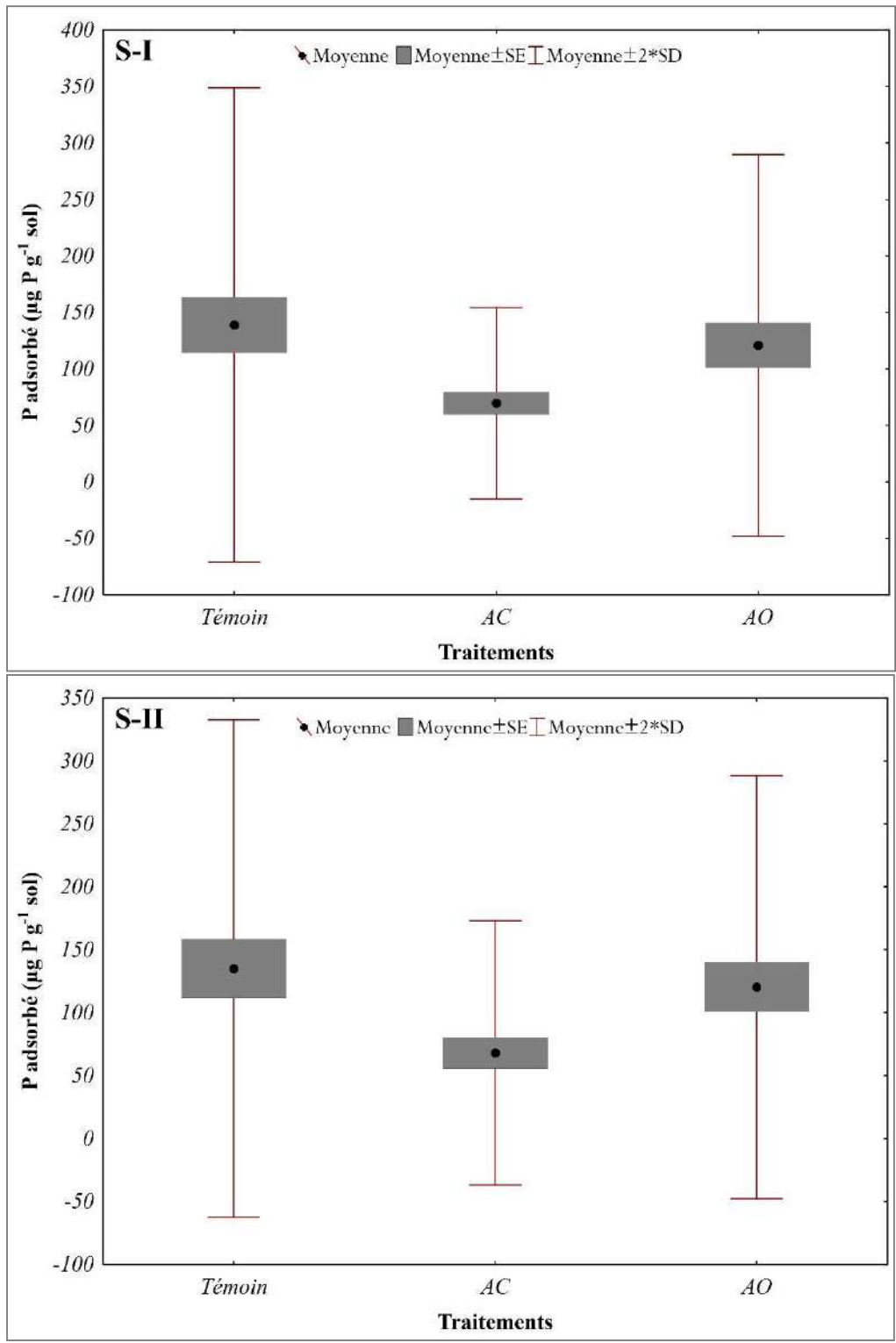


Figure. V-2 : Variation de la quantité du P adsorbé des différents traitements

V.1.2. Effet de l'addition des acides organiques sur les besoins phosphoriques du sol

Les besoins externes en phosphore (EPRs) du sol calculé à partir de l'équation de Freundlich qui est une estimation de sorption P potentielle (Wang et al., 2000). Afif et al. (1993) ont indiqué que cette concentration est une exigence de P externe adéquate pour la plupart des cultures. La forme linéaire de l'équation Freundlich est utilisée pour le calcul des quantités d'engrais P nécessaires pour produire une concentration de la solution du sol de 0,2 mg de P kg⁻¹ (EPR_{0.2}).

Tableau V-3 : Besoins en phosphore des différents traitements

		Traitements			F(p)
		Témoin [†]	AC	AO	
EPR _{0.2} (mg kg ⁻¹)	S-I	105,8±2,00 ^b	47,45±1,94 ^a	53,13±1,04 ^a	25,74 (0,00)
	S-II	100,53±3,89 ^c	13,87±2,28 ^a	48,94±0,07 ^b	
		Moyen ^{**}	Faible ^{**}	Faible ^{**}	
P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	S-I	484,59±9,16 ^b	217,31±8,88 ^a	243,33±4,78 ^a	25,74 (0,00)
	S-II	460,41±17,84 ^c	63,55±10,46 ^a	224,16±0,33 ^b	

Valeurs représentent le moyen de quatre répétitions ± SE.

Témoin, AC et AO dénote les sols étudiés traités par l'eau distillée seulement, traités par l'acide citrique, ou traités par l'acide oxalique, respectivement.

^{a-c} Les lettres indiquent une différence statistiquement significative entre les groupes déterminée par le test de DUNCAN ($P < 0,05$).

[†] : Traitements ayant 50% CaCO₃.

^{**} : Selon les intervalles donnés par Juo et Fox (1977).

Les besoins phosphoriques étaient aussi significativement diminués par l'addition d'acide organique et les plus faibles valeurs, i.e. 13,87±2,28 mg kg⁻¹ (63,55±10,46 kg P₂O₅ ha⁻¹) à 47,45±1,94 mg kg⁻¹ (217,31±8,88 kg P₂O₅ ha⁻¹) ont été enregistrées dans les S-II et S-I traités par l'acide citrique, respectivement (Tableau V-3). Si tous les traitements sont comparés à l'échelle de Juo et Fox (1977), les besoins en P des sols étudiés situent entre les besoins phosphoriques faibles et moyens. De ce fait, les acides organiques de faible poids moléculaire utilisées dans notre expérience ont le potentiel pour réduire la quantité de P nécessaire pour un développement optimum des cultures cela pourrait conduire à des avantages économiques (utilisation efficace et économique des engrais P).

V.1.3. Mobilisation de phosphore dans le sol

Les données issues de l'étude d'incubation à l'aide d'acides organiques ont révélé que la teneur en P assimilable des sols étudiés augmente significativement après le traitement par les deux acides organiques ($F = 6,73$; $P = 0,02$). Dans les sols traités par l'acide oxalique, le P assimilable (Olsen-P) a augmenté de 20 % dans le S-I et 30 % dans S-

II, par rapport au témoin. En outre, le P soluble a aussi augmenté dans les sols étudiés (tableau V-4).

Tableau V-4 : Effet des acides organiques sur quelques paramètres chimiques des sols après une incubation de 30 jours

Traitements	pH-KCl	Conc. Ca (moles)	P soluble (mg L ⁻¹)	Olsen-P (mg kg ⁻¹)	LP	PP
S-I _{témoin}	7,34±	0,00087±	0,076±	8,24±	11,62±	-8,46±
	0,04	0,000013	0,0012	0,06	0,08	0,04
S-I _{Ac}	7,53±	0,00089±	0,07±	9,52±	12±	-8,67±
	0,025	0,000	0,0025	0,48	0,05	0,04
S-I _{AO}	7,49±	0,0016±	0,079±	9,89±	12,16±	-8,6±
	0,015	0,0008	0,018	0,12	0,25	0,11
S-II _{témoin}	7,51±	0,003±	0,063±	12,08±	12,5±	-8,65±
	0,03	0,00038	0,003	0,48	0,005	0,001
S-II _{Ac}	7,46±	0,0032±	0,067±	15,74±	12,22±	-8,67±
	0,00	0,001	0,007	0,36	0,25	0,05
S-II _{AO}	7,46±	0,0032±	0,064±	15,74±	12,43±	-8,65±
	0,06	0,0001	0,000	1,58	0,13	0,06
F(p)	3,7	1,71	0,06	6,73	2,57	1,3
	(0,08)	(0,25)	(0,93)	(0,02)	(0,15)	(0,33)

Valeurs représentent le moyen de quatre répétitions ± SE.

Tous les traitements sont avec 50% CaCO₃.

Témoin, AC et AO dénotent les sols étudiés traités par l'eau distillée seulement (témoin), traités par l'acide citrique, ou traités par l'acide oxalique, respectivement.

Soluble-P, Ca²⁺, et pH_(KCl) : ont été extraite par 0,01 M of KCl (1:10 ratio).

Conc. Ca : Concentration molaire des ions Ca²⁺ dans la solution.

P assimilable : Extrait par le bicarbonate Sodium (0,5M) (1 :10 sol - solution ratio).

LP et PP : Potentiel de calcaire et de phosphore, respectivement.

L'ajout des acides organiques active la dissociation des liaisons Ca-P dans les sols alcalins (Zhuo et al., 2009a ; Zhang et al., 2009), causant une augmentation des niveaux de P facilement disponible pour les plantes. Dans cette expérience d'incubation, l'acide oxalique était très efficace en augmentant le P disponible dans les deux sols. Nos résultats concordent avec ceux obtenus par Cajuste et al. (1996) qui ont déclaré qu'augmentant la libération des anions organiques (oxalate et le citrate) la capacité maximale d'adsorption de P des sols diminue et la libération de P augmente. Il semble que dans la présente étude, l'effet de l'acide oxalique sur la mobilisation des P a dépassait les effets produits par l'acide citrique. Dans le même sens, Khademi et al. (2009) ont signalé que l'oxalate est légèrement plus efficace que le citrate en mobilisant P qui pouvait être attribué à la force de l'acide et le nombre de groupes carboxyle. L'acide oxalique (H₂C₂O₄) est un acide relativement fort. Par contre, l'acide citrique (C₆H₈O₇) est un acide organique faible avec 3

groupes carboxyle. L'oxalate a tendance à précipiter facilement en présence de Ca^{2+} (Ström et al. 2001) et réduire la teneur en carbonates active dans des sols calcaires. Gang et al. (2012) encore conclu que le modèle de la mobilisation de P par l'addition des acides organiques était fortement dépendant du type de sol et était contrôlé par l'état de P intrinsèque tels que les quantités et la distribution de la fraction de P dans le sol.

V.1.4. Matrice de corrélation

Une matrice de corrélation a été établie entre les paramètres de la sorption de phosphore et autres les paramètres calculés cités au-dessus. Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau V-5. Les paramètres de la sorption du modèle de Freundlich sont négativement corrélés avec le potentiel du calcaire et l'énergie libre de Gibbs (ΔG). Cependant, ils ont montré une corrélation positive ($P < 0,05$) avec $\text{EPR}_{0.2}$ et K_{oc} . Donc, tous ces paramètres ont un effet positif ou négatif sur la disponibilité de P dans le sol. Cette constatation suggère l'importance de tous les paramètres sélectionnés et tous indices mesurés s'avèrent très importants dans l'étude de la sorption de phosphore dans les sols riches en calcaire.

Tableau V-5 : Relations entre les paramètres calculés et les indices d'adsorption du phosphore ($n= 24$)

	Capacité de sorption	Energie de sorption	EPR _{0,2}	K _{oc}	ΔG	P soluble	Olsen-P	LP	PP
Capacité de sorption									
Energie de sorption	0,88**	"	"	"	"	"	"	"	"
EPR _{0,2}	0,88**	0,64**	"	"	"	"	"	"	"
K _{oc}	0,89**	0,76**	0,68**	"	"	"	"	"	"
ΔG	-0,78**	-0,51**	-0,79**	-0,84**	"	"	"	"	"
P soluble	0,15**	0,08**	0,05**	0,34**	-0,41**	"	"	"	"
Olsen-P	-0,47**	-0,18**	-0,47**	-0,65**	0,79**	-0,45**	"	"	"
LP	-0,48**	-0,33**	-0,26**	-0,75**	0,60**	-0,70**	0,71**	"	"
PP	0,69**	0,71**	0,53**	0,77**	-0,65**	0,69**	-0,53**	-0,81**	"

* Valeurs sont significatives à $P < 0,05$

V.2. Effets des apports P-composés organiques sur le blé

Les valeurs F et les niveaux de signification pour toutes les sources de variation, les traitements, les doses de P, et pour les interactions : traitements *doses de P sont présentés dans le tableau V-6. Les résultats montrent que l'hypothèse qui dit que la combinaison entre l'engrais P et les substances organiques augmentent les paramètres biologiques, et la biodisponibilité du phosphore plus que si l'engrais P est appliqué seul peut être acceptée.

V.2.1. Longueur de la tige, de la racine du blé

Il n'y avait pas de différences significatives dans la longueur des tiges et des racines chez les doses de P et leurs combinaisons avec des solutions organiques. Toutefois, les interactions traitements *doses de P ont indiqué des différences significatives ($P < 0,01$) dans la longueur des tiges du blé. Mais en comparaison avec le témoin, la longueur de la tige et des racines étaient significativement plus élevées dans tous les traitements avec chacune des solutions organiques par rapport aux traitements témoins. La longueur moyenne des tiges (LT) a augmenté de 18,02 cm dans le témoin pour obtenir 19,47 et 18,17 cm dans les traitements avec l'extrait de fumier (EF) et l'acide citrique (AC), respectivement. En outre, la longueur des racines (LR) a également augmenté en utilisant ces substances organiques dont les valeurs de RL ont varié de 14,77 cm dans le témoin à 16,7 et 15,87 cm lors de l'ajout de l'extrait du fumier et l'acide citrique, respectivement (tableau V-7). La longueur de la tige et des racines étaient significativement plus élevés pour tous les traitements avec engrais P et leur combinaison avec chacune des matières organiques. Généralement, la valeur optimale de la longueur des tiges et des racines a été enregistrée à l'aide de la combinaison de TSP + EF. Ceci est probablement dû à la teneur en azote (N) ajouté par l'extrait de fumier (-100 mg L^{-1}) qui pourrait renforcer la croissance végétative du blé. La croissance remarquée dans les traitements de EF pourrait également être le résultat d'une augmentation de la croissance et de l'activité microbienne provoqué par l'ajout de carbone (C) avec cette substance utilisée. Combinant des engrais P avec des solutions organiques généralement améliore la disponibilité de P dans le sol, qui stimule par conséquent le développement des racines du blé. Hopkins (2003) montre que l'effet du phosphore stimule préférentiellement la croissance des racines par rapport à celle des tiges et des feuilles. Kelly et al. (1979) a également montrent que la longueur des racines augmente avec l'augmentation des doses de P.

Tableau V-6 : Analyse de variance, valeurs de F, et signification statistique

Source de variation	ddl	LT	LR	RMS	P _{Con}	P _{Exp}	P _{Ass}	EAP	EUP	PPE
Traitements	2	1,40 ^{N.S}	0,92 ^{N.S}	1,94 ^{N.S}	222,41 ^{***}	43,71 ^{***}	320,76 ^{***}	24,12 ^{**}	217,74 ^{***}	48,18 ^{**}
Dose de P	4	1,95 ^{N.S}	1,22 ^{N.S}	7,64 ^{***}	128,04 ^{***}	25,74 ^{***}	463,64 ^{***}	13,2 ^{***}	124,26 ^{***}	342,92 ^{***}
Traitements*Dose P	8	3,15 ^{**}	1,16 ^{N.S}	7,00 ^{***}	16,63 ^{***}	4,77 ^{***}	153,68 ^{***}	8,1 ^{***}	50,14 ^{***}	30,65 ^{***}

LT: longueur des tiges; LR: longueur des racines; RMS: Rendement en matière sèche; P_{Con}: Concentration du P dans la plante; P_{Exp}: Exportation de P; EAP: Efficacité d'absorption de phosphore; EUP: Efficacité de l'utilisation de phosphore; PPE: Efficacité de P apporté. **: Significatif à $P \leq 0,01$; ***: Significatif à $P \leq 0,001$; ^{N.S}: no significatif.

Tableau V-7 : Données agronomiques de la culture de blé en réponse à l'application des différentes doses du phosphore

Traitements	EPR factor	LT (cm)	LR (cm)	RMS (g pot ⁻¹)	P _{con} (%)	P _{exp} (mg pot ⁻¹)
Témoin	0,00	15,27	14,00	0,252 ^c	0,04 ^b	0,101 ^a
	0,05	21,50	12,00	0,586 ^b	0,08 ^c	0,468 ^{ab}
	0,10	20,32	17,75	0,467 ^{ab}	0,119 ^a	0,556 ^{bc}
	0,20	15,50	13,37	0,364 ^{ac}	0,126 ^a	0,458 ^c
	0,40	17,50	16,75	0,475 ^{ab}	0,137 ^a	0,651 ^{abc}
	<i>Moy</i>	18,02	14,77	0,428	0,100	0,447
EF	0,00	19,25	14,25	0,409	0,15 ^c	0,614 ^b
	0,05	16,25	15,12	0,342	0,124 ^b	0,424 ^a
	0,10	21,25	17,87	0,550	0,179 ^a	0,984 ^a
	0,20	21,12	15,87	0,588	0,199 ^d	1,17 ^a
	0,40	19,50	17,75	0,493	0,177 ^a	0,873 ^a
	<i>Moy</i>	19,47	16,17	0,476	0,165	0,813
AC	0,00	19,37 ^a	15,00	0,375 ^a	0,129 ^b	0,484 ^a
	0,05	14,00 ^a	18,00	0,586 ^b	0,075 ^a	0,439 ^a
	0,10	19,50 ^b	13,37	0,443 ^{ab}	0,214 ^d	0,948 ^b
	0,20	21,00 ^a	15,75	0,545 ^{ab}	0,241 ^c	1,313 ^c
	0,40	17,00 ^{ab}	17,25	0,371 ^a	0,198 ^c	0,735 ^{ab}
	<i>Moy</i>	18,17	15,87	0,464	0,171	0,784

Le prélèvement des plantes a été effectué après 90 jours.

Le sol dans tous les traitements est à 25% CaCO₃.

Chaque valeur représente le moyen de trois répétitions.

EPR_{factor} : Concentrations du P dans la solution du sol ; LT : Longueur de la tige ; LR: Longueur de la racine; RMS: Rendement de la matière sèche; P_{con} : Concentration de P dans la plante; P_{exp}: Exportation de P. Dans chaque colonne et pour chaque traitement, les valeurs suivies par différentes lettres sont sensiblement différentes à $P < 0,05$ (test de Duncan).

V.2.2. Production de la matière sèche

La matière sèche est un indicateur caractéristique des conditions d'absorption des éléments nutritifs (Thevenet, 1993). La production de la matière sèche par le blé est influencée par un certain nombre de facteurs, y compris les conditions climatiques, la fertilité potentielle du sol, la dose de semis (densité) et la variété. Les données présentées dans le tableau V-7 montrent que tous les traitements en combinaison avec les substances organiques ont permis d'augmenter notablement la production de la matière sèche ($P <$

0,05) par rapport au témoin. Dans le témoin le rendement en matière sèche était de 0,428 g DM pot⁻¹. Toutefois, il a été varié de 0,476 pour le traitement avec EF à 0,464 g DM pot⁻¹ pour les traitements avec AC. Cela signifie que l'addition des substances organiques a fait une augmentation de la matière sèche produite de l'ordre de : 11,21% et 8,41% en combinant le TSP avec EF et AC, respectivement. Le rendement optimum en biomasse a été atteint avec une concentration du P dans la solution du sol (EPR_{factor}) de 0,05 mg P L⁻¹ pour le témoin et les traitements avec AC. Dans les traitements avec EF le rendement optimum a été obtenu à une EPR_{factor} de 0,20 mg P L⁻¹. La nature de la réponse à l'addition de P dépendait sur le sol et la variation dans le rendement en biomasse avec les doses de P a été estimée graphiquement en traçant le rendement en matière sèche des tiges contre EPR_{factor} . Le meilleur rendement en biomasse de 0,58 et 0,595 g DM pot⁻¹ a été obtenu avec EPR_{factor} de l'ordre de 0,36 mg P L⁻¹ pour le témoin et les traitements AC, respectivement. Toutefois, dans les traitements EF le rendement optimum en biomasse de 0,65 DM g pot⁻¹ peut être atteint à 0,397 mg P L⁻¹ (Fig.V-3). Nos résultats montrent que la production de matière sèche est influencée par la fertilisation minérale. Le sol amendé avec application combinée de TSP + EF a enregistré des rendements optimaux en matière sèche (0,476 g pot⁻¹). Théliér-huché et *al.* (1996) indiquent qu'il y a une interaction positive entre l'azote et du phosphore pourrait augmenter les performances d'engrais P et améliorer la solubilité de P et l'absorption (Hafsi, 1990). Dans cette étude, le rendement en biomasse totale augmente progressivement avec les doses de P. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par Mehdi et *al.* (2007). Deng et *al.* (2014) ont trouvé des résultats similaires pour la culture de maïs. Pellerin et *al.* (2000) ajoutent que l'augmentation de la production de matière sèche après l'application de P est le résultat de l'amélioration du système racinaire.

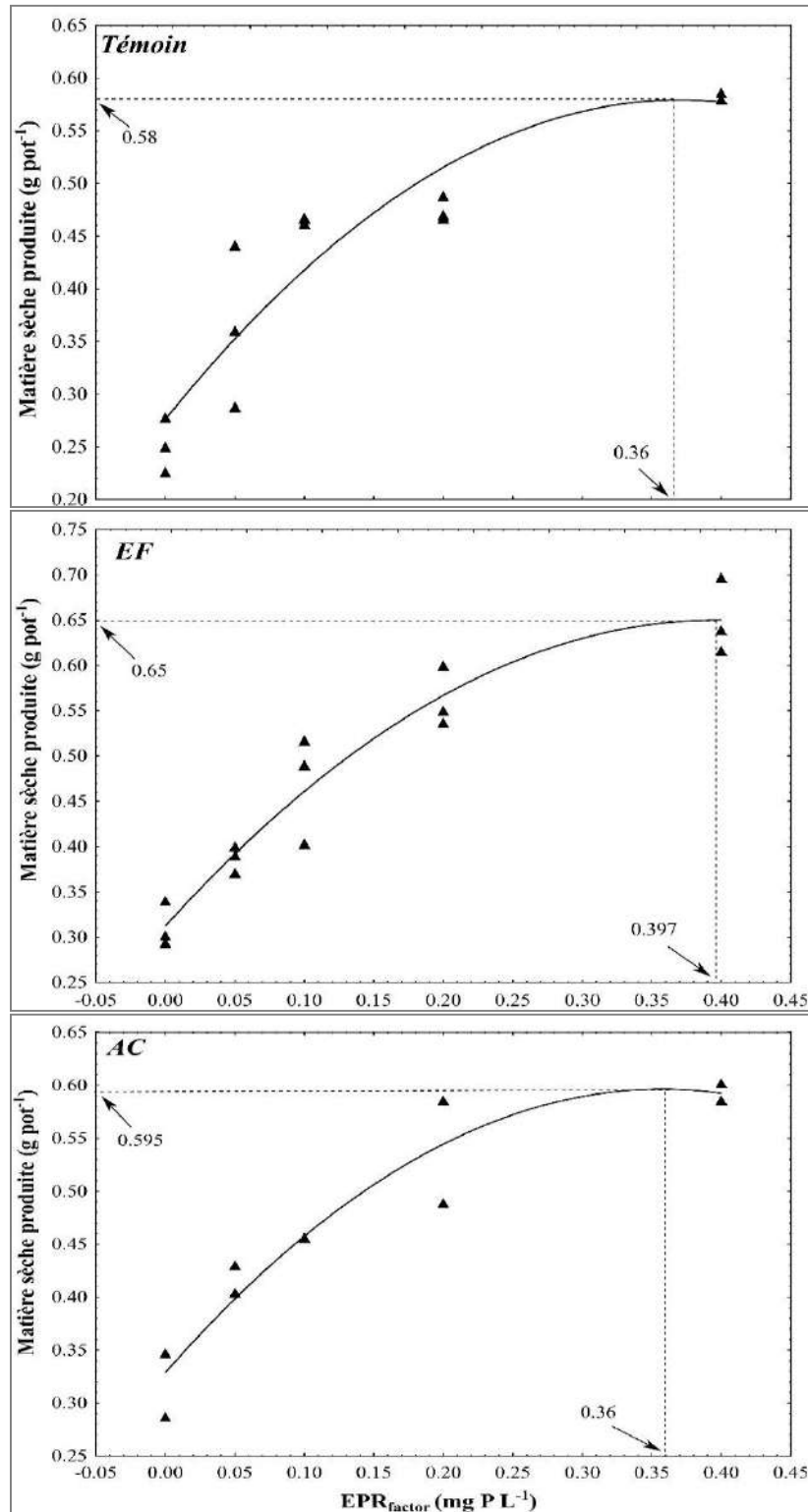


Figure V-3 : Production optimale de la matière sèche en fonction de la concentration en P dans la solution du sol

V.2.3. Teneur en phosphore du blé

L'analyse de variance (ANOVA) a révélé des différences significatives ($P < 0,05$) entre le TSP en combinaison avec des substances organiques pour la concentration du P dans le tissu végétal du blé. La concentration de P a enregistré une moyenne de 0,100 % dans le traitement témoins. Cependant, dans les sols amendés par les substances organiques, la concentration de P a été augmentée à des concentrations de P 0,165 % pour les traitements EF et 0,171 % pour les traitements AC. En général, la concentration de phosphore dans le blé a eu son maximum de 0,199% et 0,241% dans une concentration de P à l'équilibre (EPR_{factor}) de l'ordre de : 0,20 mg P L⁻¹. Cette dernière rapportée dans la littérature pour être un seuil pour plusieurs cultures. Les valeurs trouvées des concentrations de P dans la plante sont situées dans la gamme proposée par Grant et *al.* (2004), qui ont déclaré que la teneur moyenne de P dans la paille de blé est située entre 0,1 et 0,4%. La concentration de P augmente avec l'augmentation des doses de P et l'addition de substances Organominerals. Ces résultats concordent avec ceux de Heidi (2011) qui a utilisé les différents niveaux de fumier de volaille comme amendement du sol. Leurs résultats ont montré que la concentration de P augmentait dans les traitements où seulement les fientes de volaille ont été appliquées comme une source organique. Nos résultats concernant la concentration de P dans les racines étaient similaires à ceux de Dusberg (1989) qui ont déclaré que l'effet combiné des engrais organique et minéraux influence la concentration de P des racines.

V.2.4. Exportation du phosphore par le blé

Le prélèvement de P a été augmenté avec l'accroissement des doses de P et l'addition de substances organiques. L'analyse de variance a indiqué une différence significative ($P < 0,05$) entre les traitements TSP en combinaison avec des substances organiques pour l'absorption de P par le blé. L'absorption de P dans les pots de témoin était de 0,447 mg P pot⁻¹. Toutefois, dans des pots amendés avec des substances organiques l'absorption moyenne de P étaient 0,784 et 0,813 mg P pot⁻¹, respectivement pour les combinaisons de TSP + AC et TSP + EF. Plusieurs paramètres dans cette étude ont montré une corrélation significative entre eux. La plupart des paramètres observés au cours de l'étude ont une corrélation significative ($P < 0,05$) (positive) avec l'absorption de P, à savoir : EPR_{factor} , longueur de tige, rendement de la matière sèche, rendement relatif de la matière sèche, concentration de P de la plante, Olsen-P, efficacité d'adsorption P

(Tableau V-8). Toutefois, l'absorption de P et P efficacité de l'utilisation (PUE) sont négativement corrélés ($P < 0,01$; $R^2 = 0,74$).

V.2.5. Estimation des exigences en phosphore du blé

Les besoins en engrais des cultures spécifiques peuvent être estimés comme exigences en P externes et internes. L'efficacité de phosphore peut être définie comme la capacité d'une plante pour produire un certain pourcentage de son rendement maximal à un certain niveau de P dans le sol P. Elle est donc souvent appelée besoin externe de P, c'est-à-dire le P contenu dans le sol pour produire 95 % de rendement maximal. L'efficacité de P avec laquelle le phosphore est utilisé pour produire un rendement, c'est-à-dire la quantité de P nécessaire dans la plante pour produire une unité de matière sèche (Loneragan et Asher, 1967). Ceci est souvent appelé besoin interne de P. Fox (1981) a signalé que l'exigence de phosphore, est plus externe qu'interne, et pour la plupart des cultures ces exigences sont plus grandes pendant le premier stade de croissance. Pour la détermination des exigences de P, Les concentrations en P de la solution (EPR_{factor}) ont été tracées contre le rendement relatif du blé (à 95 %) (Webb, 1972). Les données ont montré que pour atteindre un rendement maximum près (à 95 %), la culture de blé a exigé des concentrations de 0.20, 0.29 et 0.299 mg P L⁻¹ pour les traitements suivants : témoins, EF et AC (Fig. V-4). Ces dernières concentrations représentent ce qu'on appelle « besoins externes de P » définie comme la concentration de phosphore dans la solution du sol associée près du rendement maximal (à 95 %). Nos résultats ont révélé que les exigences externes de P ou la concentration de P dans la solution du sol (EPR_{factor}) est en général proche de 0,20 mg P L⁻¹ rapportée dans la littérature comme un seuil pour de nombreuses cultures (Iyamuremye et al., 1996 ; Nziguheba et al., 1998 ; Duffera et Robarge, 1999). Lopez-Hernandez et al. (1987) ont ajouté que la variété des plantes peut être un facteur qui peut influencer les besoins externes de P des cultures. Sanchez et Uehara (1980) a déclaré que la concentration en P de la solution du sol nécessaire à la croissance maximale de la plante diffère entre les espèces, les stades de croissance et les taux de croissance et avec les propriétés du sol. Les exigences internes de P de blé ont été déterminées en faisant un graphique des concentrations de P dans la plante contre le rendement relatif maximum (à 95 %). Les valeurs obtenues étaient de : 0,133 - 0,187 et 0,231 % pour les traitements témoin, EF et AC, respectivement (Fig. V-5). Rashid et Bughio (1993) ont rapporté que la concentration interne de P dans les tiges entières de blé

(0.28 %) a été associée avec un rendement maximal de 95 %. Reuter et *al.* (1997) ont estimé les valeurs critiques de P (%) de grains de blé entre 0,19 et 0,23 % pour un rendement maximum de grain.

Tableau V-8 : Matrice de corrélation entre les paramètres étudiés ($n = 45$)

	EPR_{factor}	LT	LR	RMS	RRMS	P_{Con}	P_{ass}	PPE	P_{Exp}	EAP	EUP
EPR_{factor}	-										
LT	0,02	-									
LR	0,26	-0,16	-								
RMS	0,13	0,27	0,16	-							
RRMS	0,15	0,41 [†]	0,17	0,85 [†]	-						
P_{Con}	0,45 [†]	0,38 [†]	0,13	0,25	0,33 [†]	-					
P_{ass}	0,14	0,32 [†]	0,11	0,59 [†]	0,71 [†]	0,47 [†]	-				
PPE	-0,01	0,15	0,05	0,53 [†]	0,60 [†]	0,24	0,66 [†]	-			
P_{Exp}	0,37 [†]	0,42 [†]	0,18	0,65 [†]	0,61 [†]	0,87 [†]	0,64 [†]	0,36 [†]	-		
EAP	0,46 [†]	0,29	0,17	0,36 [†]	0,23	0,76 [†]	0,00	0,05	0,73 [†]	-	
EUP	-0,43 [†]	-0,37 [†]	-0,17	-0,34 [†]	-0,41 [†]	-0,86 [†]	-0,45 [†]	-0,27	-0,74 [†]	-0,69 [†]	-

EPR_{factor}: Concentrations du P dans la solution du sol; LT: Longueur de la tige; LR: Longueur de la racine; RMS: Rendement de la matière sèche; RRMS: Rendement relative de la matière sèche; P_{Con}: Concentration de P dans la plante; P_{ass}: P assimilable dans le sol; P_{Exp}: Exportation de P; EAP: Efficacité d'absorption de phosphore; EUP: Efficacité de l'utilisation de phosphore; PPE: Efficacité de P apporté. †: Corrélations significatives à $P \leq 0,05$

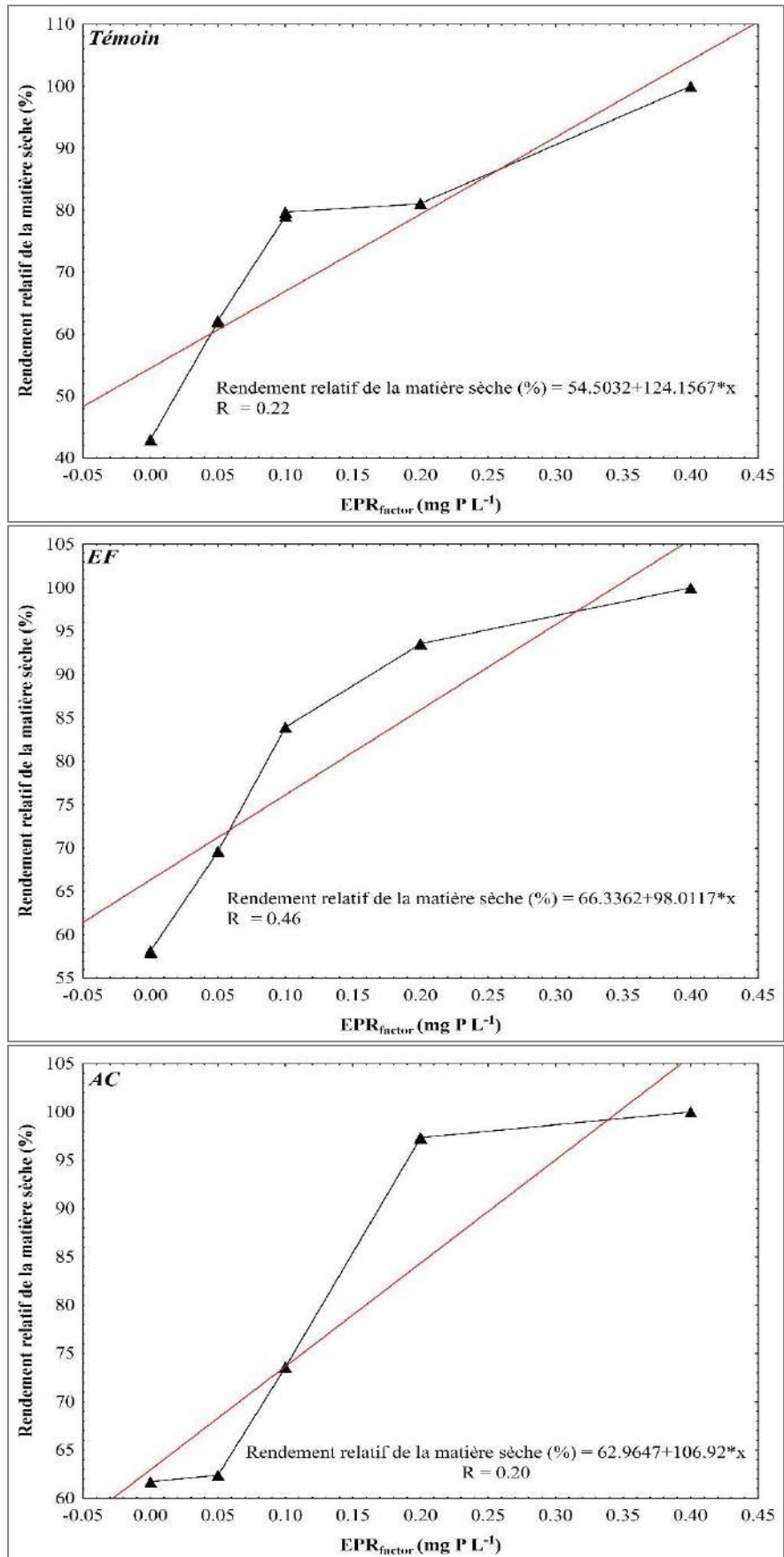


Figure V-4 : Les besoins externes du blé en phosphore

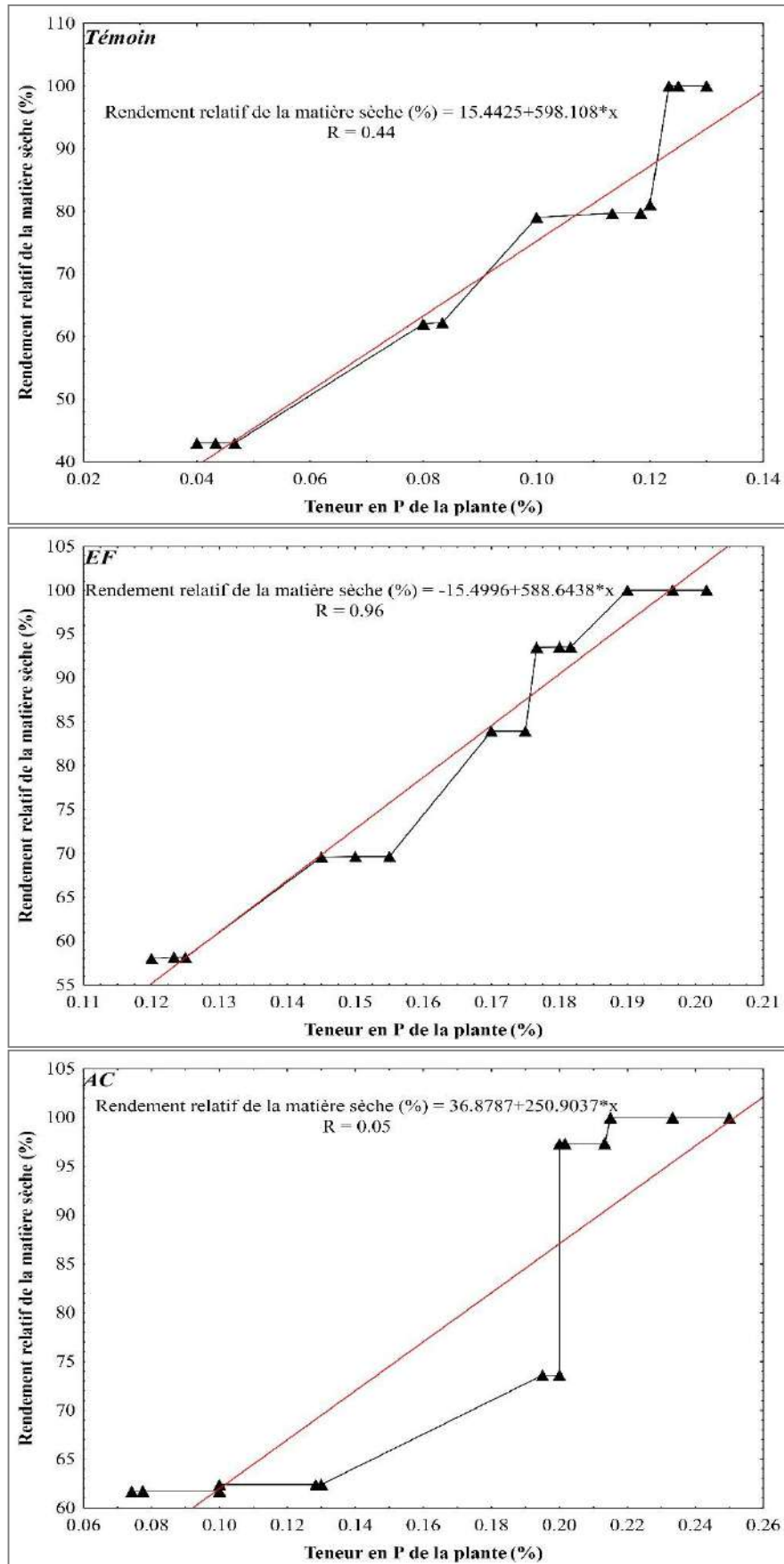


Figure V-5 : Les besoins internes du blé en phosphore

V.2.6. Disponibilité du phosphore pour le blé en présence des substances organiques

A partir des apports phosphatés, la quantité du phosphore assimilable (Olsen-P) a été augmentée par la combinaison du TSP avec des substances organiques, les valeurs très inférieures du P assimilable ont été enregistrées dans les traitements témoin sans apports organiques. Cependant, l'intégration de l'engrais P avec des substances organiques augmente la disponibilité de P où les plus hautes valeurs du P assimilable ont été enregistrées dans les traitements TSP+EF (20,55 mg kg⁻¹) et TSP+AC (17,80 mg kg⁻¹), soit une augmentation de l'ordre de 27,87 et 10,76 % respectivement par rapport au témoin (Fig. V-6). Tous les sols amendés ont montré une diminution significative dans le PPE après 90 jours. La diminution du phosphore assimilable (Olsen-P) avec le temps a été prédite après avoir calculé l'efficacité de P (PPE). Les résultats ont montré que l'efficacité du P ajouté dans cette période était variée de 8,32 à 12,83%. Dans les traitements témoin sans apport des substances organiques, les résultats ont montré que 91,6% du P appliqué devient non-assimilable après 90 jours. Toutefois, la combinaison des substances organiques avec le TSP a légèrement augmenté le PPE, où les valeurs de PPE les plus élevées (12,83 % soit un taux de diminution de l'ordre de 87% après 90 jours) ont été enregistrées en combinant le TSP avec l'acide citrique (AC) (Fig. V-7).

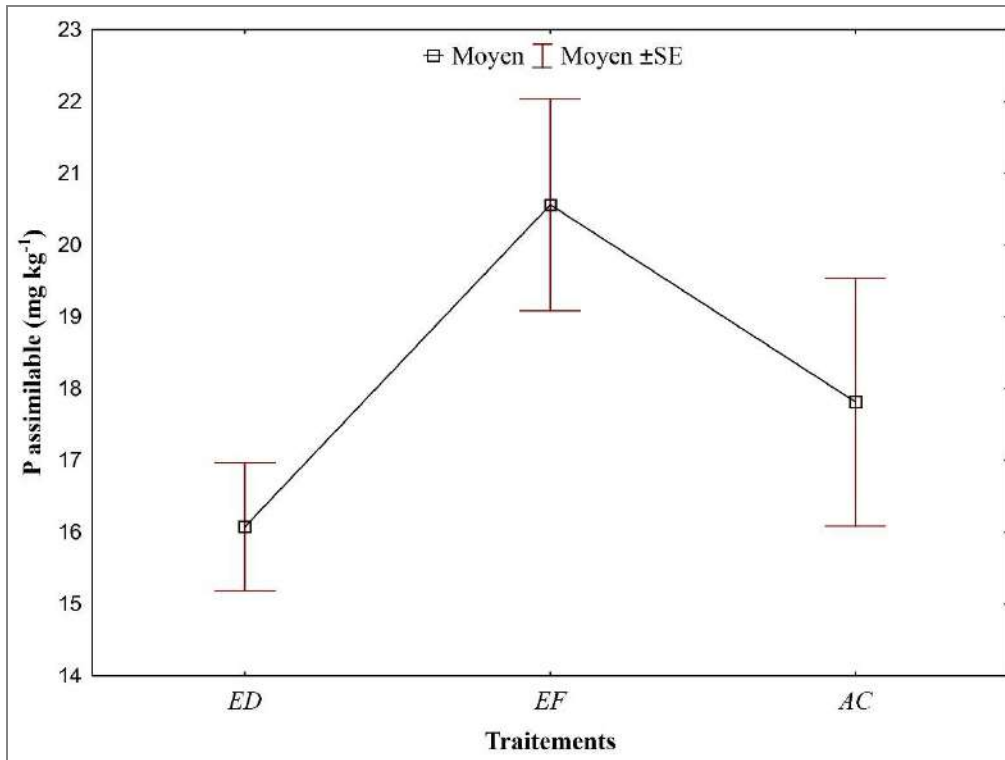


Figure V-6 : Disponibilité du phosphore dans le sol en fonction de différents traitements appliqués

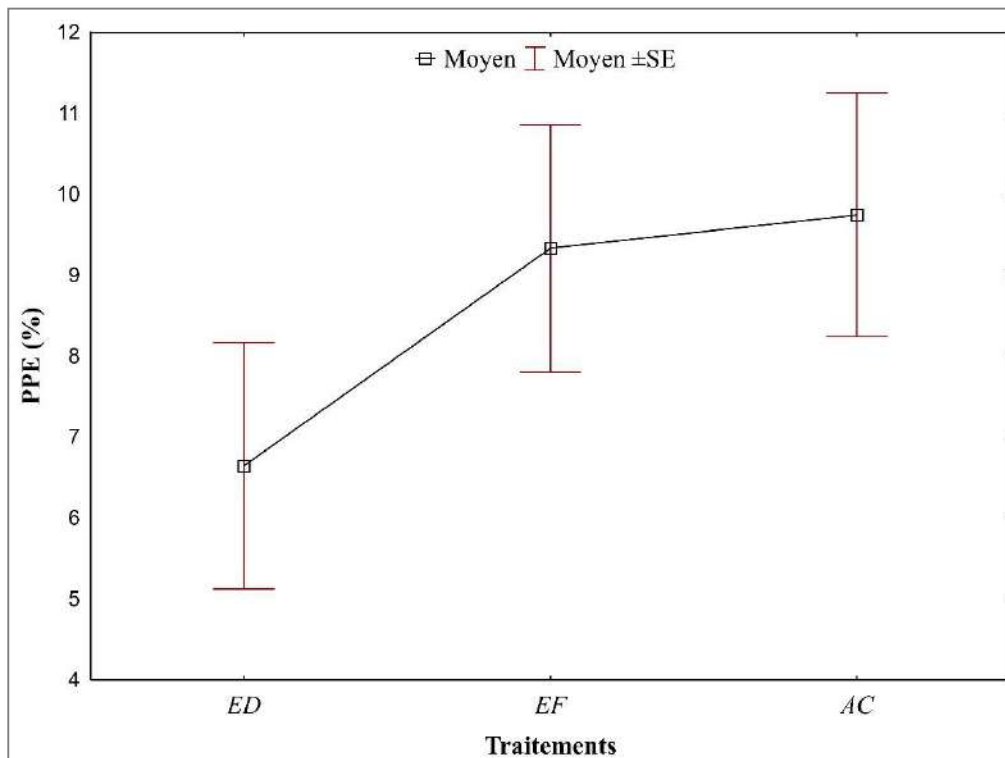


Figure V-7 : Variation de l'efficacité de l'engrais P appliqué au sol en fonction de différents traitements appliqués

De ce fait, tous les traitements appliqués ont exercé un effet très favorable sur la disponibilité de P dans le sol. Les apports organiques ont été signalés pour accroître la disponibilité de P dans les sols riches en calcaire (Iyamuremye et Dick, 1996 ; Guppy et al., 2005 ; Agbenin et Igbokwe, 2006 ; Gichangi, 2009). En outre, les traitements avec l'acide citrique (AC) ont montré une augmentation de la disponibilité de P par rapport au témoin. Les acides organiques de faible poids moléculaire peuvent contribuer à activer des fractions de Ca-P qui sont fixées dans les sols calcaires (Zhuo et al., 2009b). Dans les traitements témoin sans apport des substances organiques, les résultats ont montré que 91,6% du P appliqué devient non-assimilable après 90 jours. Toutefois une baisse de l'ordre de 88 et 89 % de P extractible ont été enregistré dans les sols amendés par l'extrait du fumier et la solution d'acide citrique, respectivement, ce qui indique que l'intégration de matériaux organiques et TSP pourrait sauver certaine quantité de P assimilable au fil du temps. Jalali (2006) a trouvé qu'en moyenne de 79 % de P ajouté n'était plus extractible après 2160h (90 jours) d'incubation dans quatre sols calcaires. Javid et Rowell (2002) ont constaté qu'entre 45 et 80 % de l'Olsen-P n'était plus extractible après 2400h (100 jours) à 25°C.

V.2.7. Effets des substances organiques sur l'efficacité d'absorption et d'utilisation de phosphore par le blé

La figure V-8 montre que l'efficacité d'absorption de phosphore (EAP) était plus élevée dans les sols amendés par l'acide citrique (AC) que dans les traitements EF et augmente avec l'accroissement des doses de P. Les données relatives aux EAP dans les traitements témoin étaient de 0,26 mg P pot⁻¹. Toutefois, une moyenne de 0,39 et 0,45 mg P pot⁻¹ ont été enregistrées dans des sols amendés par le EF et AC, respectivement. La figure V-8 a montré que l'efficacité d'utilisation de phosphore (EUP) et les prélèvements de phosphore par le blé sont à la fois significativement différente entre les sols amendés par les substances organiques. Les sols non amendés, les valeurs d'EUP étaient de 12,14 g DM par g de P adsorbé pot⁻¹. Toutefois, une moyenne de 6,26 et 6,97 g DM par g de P adsorbé pot⁻¹ ont été enregistrées dans les sols amendés par EF et AC, respectivement (Fig. V-9). L'efficacité d'absorption du phosphore (EAP) a augmenté avec l'utilisation des deux substances organiques et il était plus élevé avec l'acide citrique que l'extrait de fumier (EF). Les apports combinés d'engrais P avec les substances organiques (AC et EF) ont augmenté l'EAP de blé de l'ordre de : 50 à 73 % pour les traitements EF et AC, respectivement par

rapport au témoin. Cela peut être lié à une relation forte entre l'EAP et les prélèvements de P par le blé ($R^2 = 0,73$; $P < 0,05$). L'efficacité d'utilisation de phosphore (EUP) est un indicateur important pour tenir compte de l'efficacité d'absorption de phosphore, qui peut être calculée en divisant le rendement de la matière sèche produite sur la quantité de phosphore adsorbé ou exporté (P_{exp}).

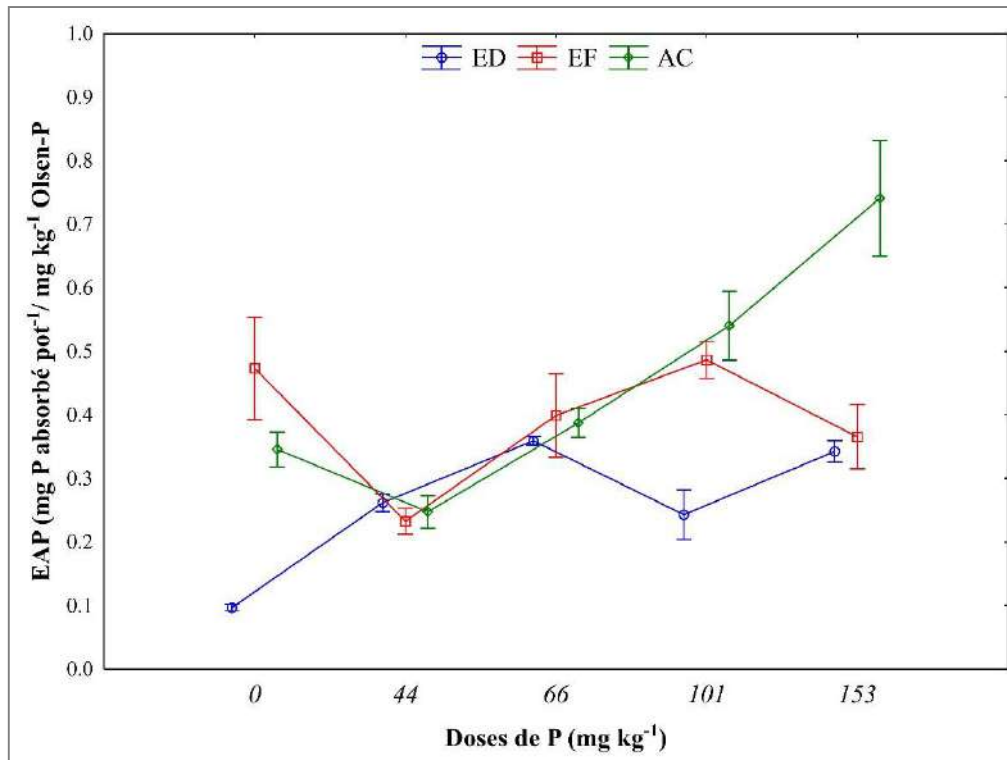


Figure V-8 : Evolution de l'efficacité d'absorption du phosphore en fonction de différents traitements et doses du P appliqués

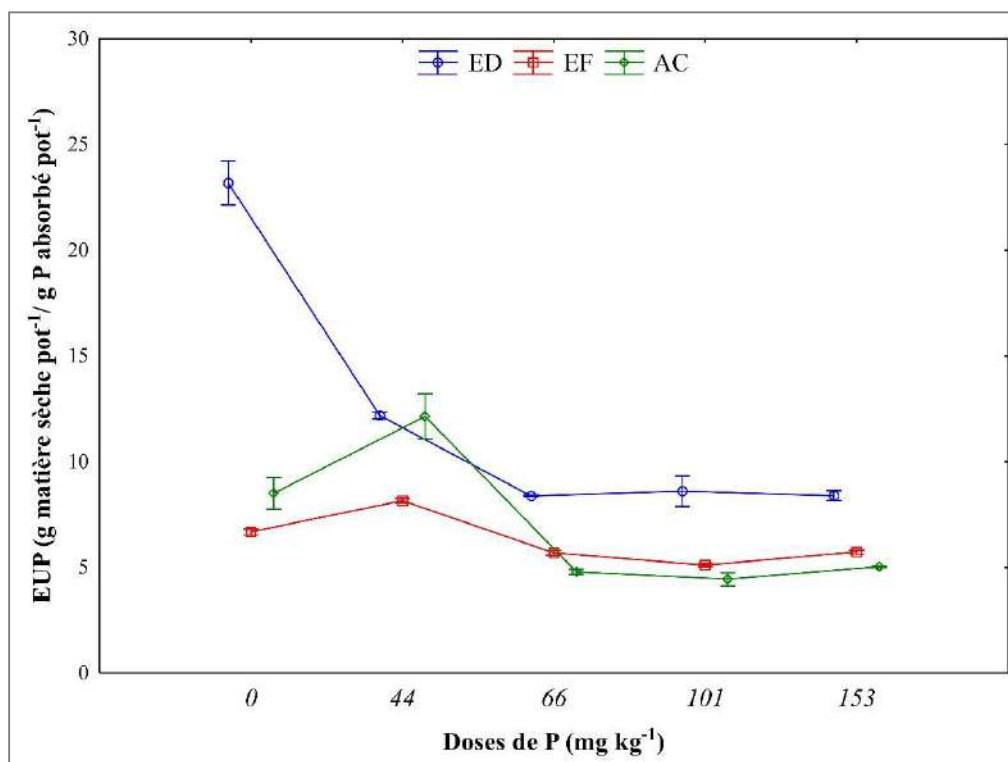


Figure V-9 : Evolution de l'efficacité d'utilisation du phosphore par le blé en fonction de différents traitements et doses du P appliqués

Dans cette étude, la combinaison d'engrais P avec des substances organiques pourrait accroître fortement quantité de P exporté par le blé, et par conséquence l'efficacité d'utilisation (EUP) du P par le blé va diminuer. Ces résultats confirment ceux obtenus par Castillo et *al.* (2013), qui a signalé que, l'efficacité d'utilisation de phosphore a baissé à des niveaux élevés de P.

V.2.8. Conclusion

La compréhension de la chimie de l'adsorption du phosphore dans les sols est essentielle pour une meilleure pratique de gestion des engrais et pour améliorer la l'efficacité d'utilisation des engrais P. Les résultats de l'étude suggèrent que l'application combinée des acides organiques et des engrais P pourrait être considérée comme une nouvelle approche efficace de gestion des engrais phosphatés dans les sols calcaires. Grâce à une mobilisation accrue de phosphore dans le sol, l'application des acides organiques ainsi que de l'engrais minéral pourrait aider à réduire la quantité des apports en matière d'engrais sans qu'il ait de répercussions négatives sur les rendements des cultures.

Au terme de ce travail de recherche, sur l'appréciation de l'effet des doses d'engrais

phosphaté, apporté en combinaison avec l'acide citrique et l'extrait du fumier, sur le comportement et la nutrition phosphatée du blé dur, nous avons obtenu des résultats qui nous permettent de constater que l'effet des apports phosphatés ainsi que les traitements appliqués est non significatif sur la longueur de la tige, la longueur des racines et la biomasse sèche produite. Quant à la nutrition phosphatée, les traitements et les apports du phosphore ont influencés positivement sur la teneur totale en phosphore du blé, notamment avec l'utilisation combiné de l'acide citrique et le phosphore. Les traitements et les doses ont permet d'augmenter l'exportation du phosphore par le blé. En ce qui concerne le devenir du phosphore assimilable dans le sol, les traitements appliqués ainsi que les doses ont exercé un effet favorable sur l'amélioration de la disponibilité du phosphore dans les sols fertilisés. Les résultats obtenus restent préliminaires et avec d'autres recherches similaires nous pouvons effectuer un raisonnement de la fertilisation phosphatée qui prend en compte la nature physico-chimique des sols du Sahara algérien notamment de type calcaire.

ÉTUDE DE L'IMPACT DES ACIDES ORGANIQUES SUR LA DYNAMIQUE D'ENGRAIS PHOSPHATÉ

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

Datago *et al.* (2002) ajoutent que le changement de la composition de la solution du sol par exemple dans notre cas où nous avons apporté de l'engrais au sol, ceci peut influencer sur la dynamique du phosphore. La caractérisation du phosphore assimilable demeure toujours nécessaire à fin d'établir un jugement ou bien un diagnostic sur le comportement de la culture vis-à-vis à cet élément, ainsi elle permet d'élaborer un pronostic sur la fertilité phosphatée d'un sol et préconiser des recommandations en matière de fertilisation. C'est pourquoi, il devient important de ressortir les relations réelles existant entre la fraction du phosphore susceptible d'être prélevée par la culture et le phosphore extrait par les réactifs chimiques conventionnels. En effet, l'évolution du phosphore assimilable dans le sol est toujours affectée par un certain nombre des paramètres à savoir : le pH, la matière organique, le calcaire, les sels solubles...etc. Tous ces paramètres rentrent en joue dans le statut phosphorique du sol.

Les valeurs moyennes obtenues permettent de dégager :

- L'effet de la fertilisation phosphatée sur la disponibilité du phosphore en absence et en présence d'acides organiques et de calcaire ;
- L'effet de la durée d'incubation sur la disponibilité du phosphore dans le sol en absence et en présence d'acides organiques.

VI.1. Impact de l'amendement organo-calcaire et phosphorique sur le P assimilable

Tableau VI-1 : Évolution des teneurs en phosphore assimilable en fonction des périodes d'incubation en sol non amendé par calcaire.

Durée d'incubation (h)	Traitements	P assimilable (mg kg ⁻¹)
240	P0-E _b	12,38
	P0-A _c	14,00
	P0-A _o	16,13
	MAP-E _b	28,31
	MAP-A _c	29,75
	MAP-A _o	29,75
480	P0-E _b	22,06
	P0-A _c	23,31
	P0-A _o	22,25
	MAP-E _b	15,00
	MAP-A _c	24,94
	MAP-A _o	25,06
720	P0-E _b	7,31
	P0-A _c	6,44
	P0-A _o	7,19
	MAP-E _b	15,94
	MAP-A _c	16,00
	MAP-A _o	18,25
960	P0-E _b	3,13
	P0-A _c	2,75
	P0-A _o	3,19
	MAP-E _b	16,69
	MAP-A _c	16,56
	MAP-A _o	15,50

P0 : Traitements sans apport d'engrais ; E_b, A_c et A_o : Traitements ayant 50% CaCO₃ et irrigués avec de l'eau distillée, solution d'acide citrique et solution d'acide oxalique, respectivement.

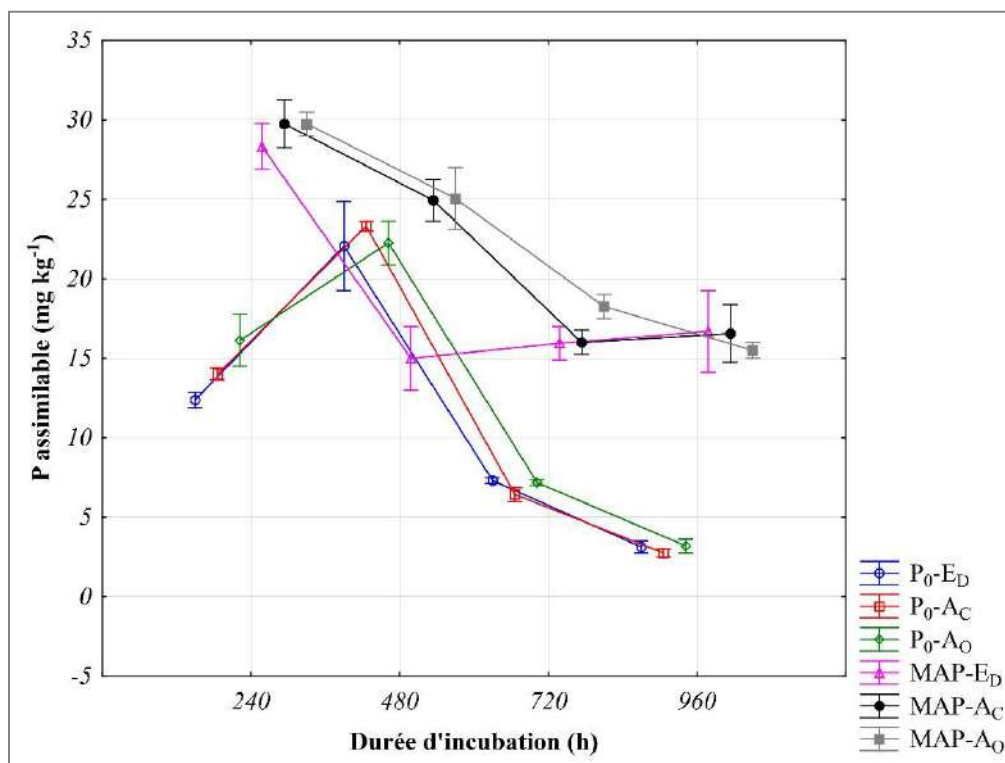


Figure VI-1 : Evolution du phosphore assimilable en fonction des périodes d'incubation dans les traitements non amendés en calcaire

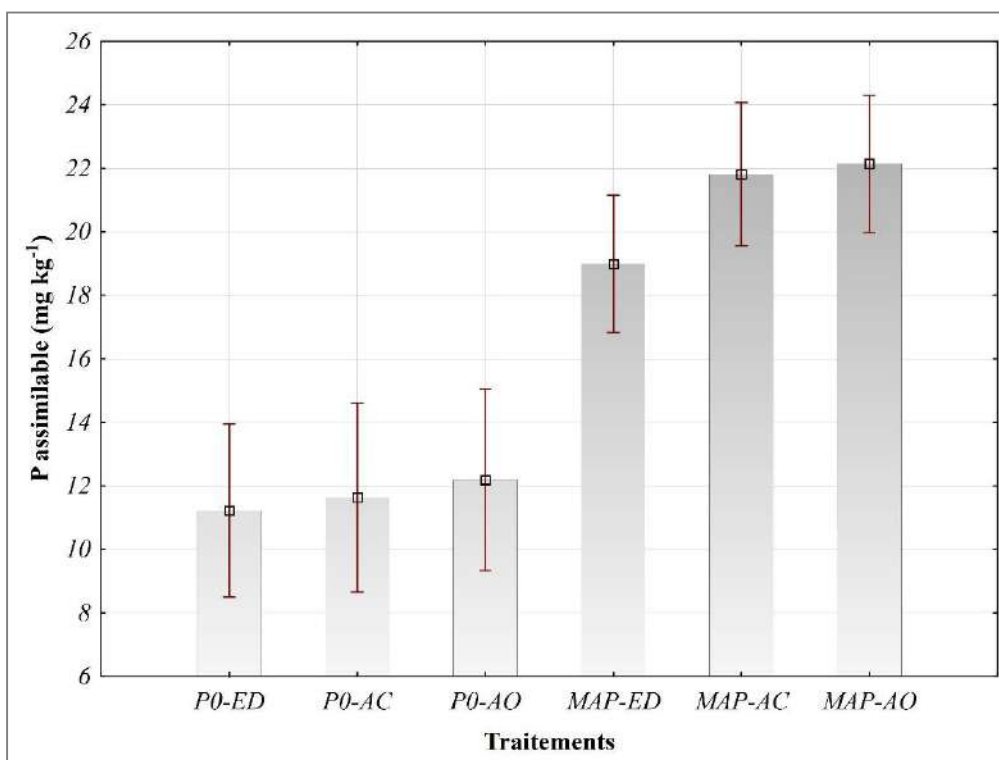


Figure VI-2 : Évolution des teneurs en phosphore assimilable en fonction des différents traitements non amendés par calcaire

Tableau VI-2 : Évolution des teneurs en phosphore assimilable en fonction des périodes d'incubation en sol amendé par le calcaire

Durée d'incubation (h)	Traitements	P assimilable (mg kg ⁻¹)
240	P0-E _b	8,44
	P0-A _c	9,75
	P0-A _o	10,13
	MAP-E _b	44,56
	MAP-A _c	44,25
	MAP-A _o	40,94
480	P0-E _b	6,56
	P0-A _c	9,00
	P0-A _o	10,00
	MAP-E _b	34,63
	MAP-A _c	34,31
	MAP-A _o	37,56
720	P0-E _b	10,38
	P0-A _c	8,25
	P0-A _o	8,88
	MAP-E _b	31,56
	MAP-A _c	25,13
	MAP-A _o	30,25
960	P0-E _b	2,50
	P0-A _c	2,50
	P0-A _o	2,63
	MAP-E _b	26,56
	MAP-A _c	16,56
	MAP-A _o	28,06

P0 : Traitements sans apport d'engrais ; E_b, A_c et A_o : Traitements ayant 50% CaCO₃ et irrigués avec de l'eau distillée, solution d'acide citrique et solution d'acide oxalique, respectivement.

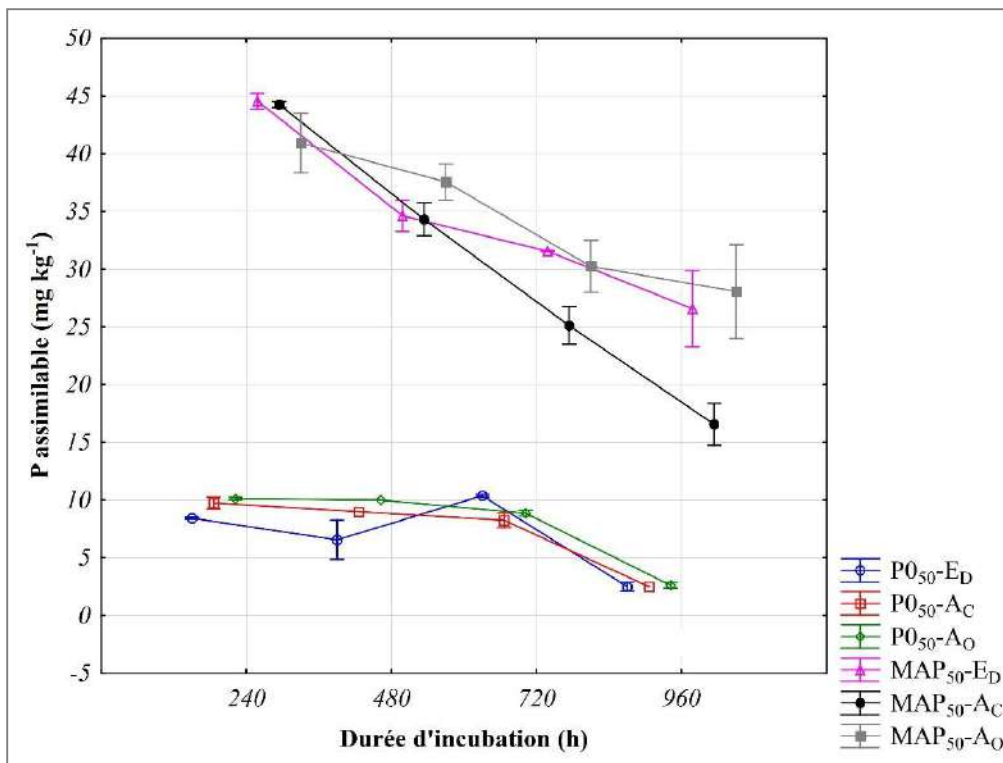


Figure VI-3 : Évolution du phosphore assimilable en fonction des périodes d'incubation dans les traitements amendés en calcaire

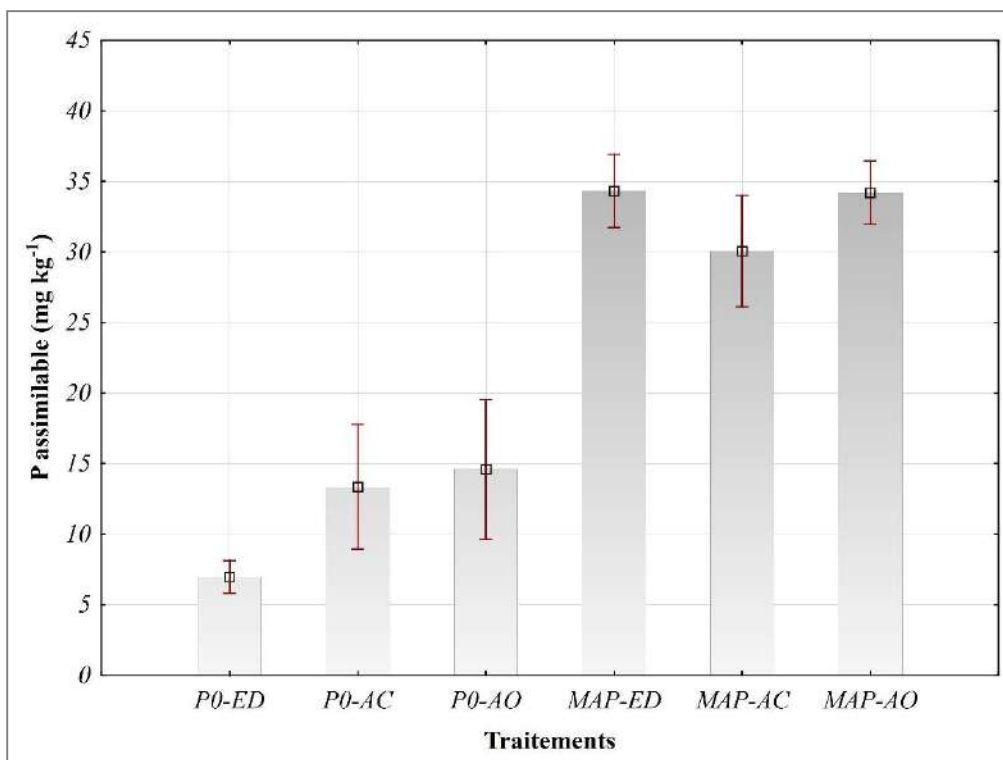


Figure VI-4 : Évolution des teneurs en phosphore assimilable en fonction des différents traitements amendés par calcaire

Après l'usage des acides organiques, les résultats obtenus s'avèrent importantes comparés aux normes d'interprétation habituellement employées (Olsen et *al.* 1954), les traitements étudiés se sont révélés riches en phosphore soluble ; ceci confirme la constatation faite par Amrani (1997) qui indique que le taux de disponibilité du phosphore apporté aux sols est élevé dans les sols sableux et faible dans les sols argileux. Les résultats obtenus attestent que l'évolution des teneurs en phosphore assimilable dans le sol diminue par les moyennes en fonction des différentes périodes d'incubation. Cela implique qu'au fur et à mesure qu'on prolonge la durée d'incubation, le teneur en phosphore assimilable diminue. La cinétique décroissante de disponibilité du phosphore assimilable dans le sol pour les trois traitements est essentiellement le fait des prélèvements du phosphore par les plantes mais aussi dû aux transferts du phosphore vers des formes inassimilables lorsque le temps de contact entre sol et apport d'engrais croît (Gervy, 1970 ; Arakrak, 1989 ; Fardeau, 1993). Cette diminution des quantités de P peut être générée par une fixation du P par le sol et l'intensité de fixation du phosphore décroissante en fonction du temps. Les combinaisons des engrais phosphatés avec les deux acides organiques (acide citrique et l'acide oxalique) ont exercé un effet très favorable sur la disponibilité du P dans le sol. L'utilisation des substances organiques (ex. acides...etc.) représente une des solutions pouvant contribuer à l'amélioration de la disponibilité du phosphore dans les sols. Plusieurs recherches ont montrés que les suppléments organiques peuvent augmenter la fraction bio disponible du phosphore dans le sols où le pouvoir fixateur du P est élevé (Iyamuremye et Dick, 1996; Guppy et *al.*, 2005 ; Agbenin et Igbokwe, 2006; Gichangi, 2009). L'addition des acides organiques ayant un faible poids peut contribuer à l'activation des fractions Ca-P qui sont bloquées dans les sols riches en calcaire (Zhuo et *al.*, 2009b ; Zhang et *al.*, 2009). La solubilité de ces ions phosphates associées aux Ca^{2+} augmente grâce aux acides organiques (ex. citrique) qui sont capables de former des complexes stables.

VI.2. Impact de l'amendement organo-calcaire et phosphorique sur le P soluble

Après une courte durée d'incubation qui est de 20 jours, On a constaté une diminution des quantités du phosphore soluble pour tous les traitements même pour le sol témoin (Fig. VI-5a et Fig. VI-6a).

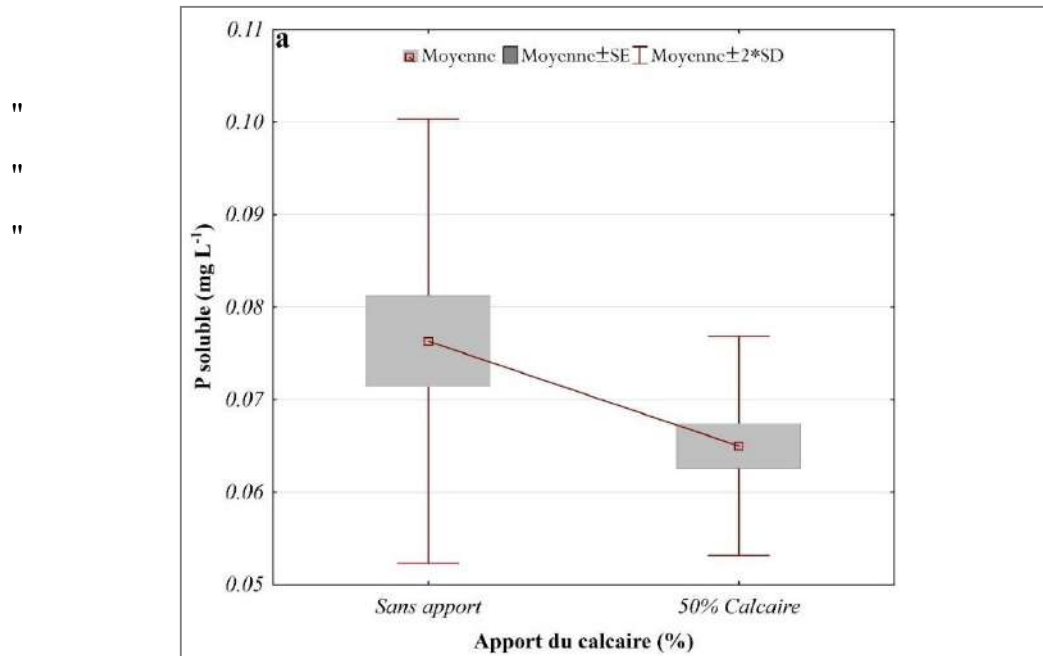


Figure VII-5a : Évolution de la teneur en phosphore soluble en fonction du taux de calcaire dans les traitements non fertilisés

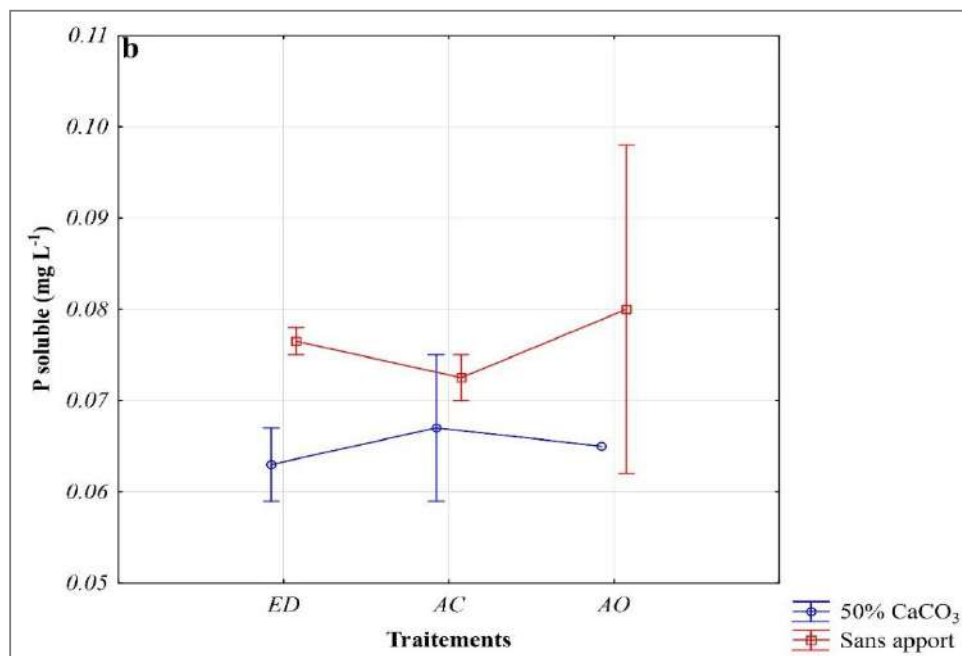


Figure VII-5b : Évolution de la teneur en phosphore soluble en fonction des apports organiques dans les traitements non fertilisés

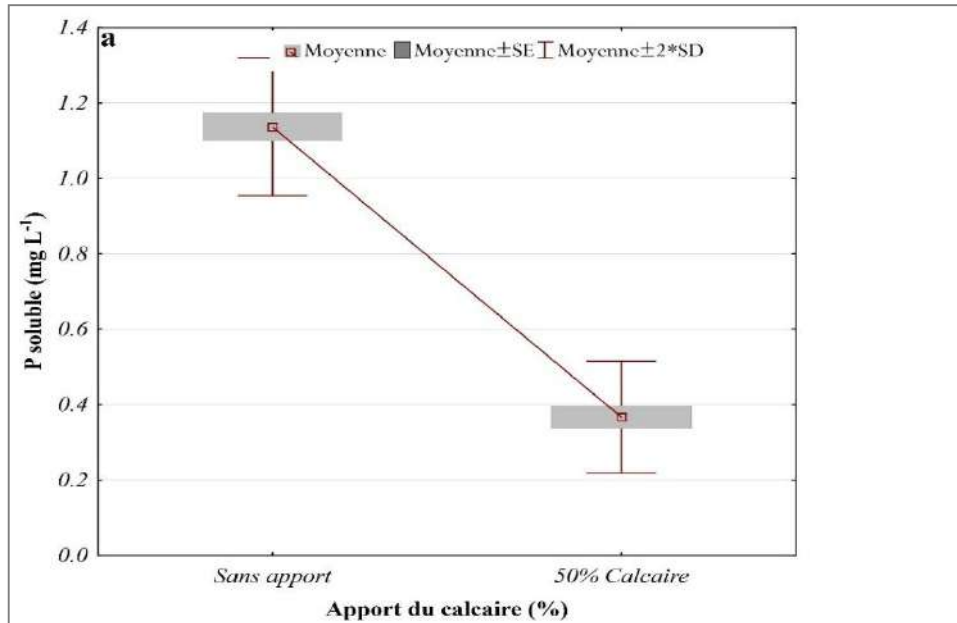


Figure VI-6a : Évolution de la teneur en phosphore soluble en fonction du taux de calcaire dans les traitements fertilisés

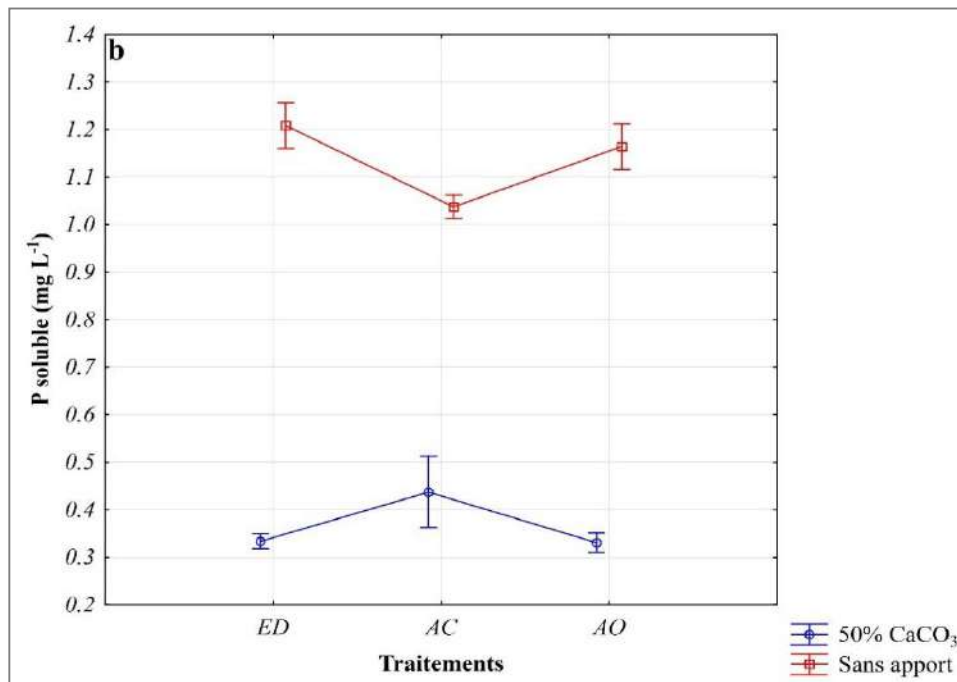


Figure VI-6b : Évolution de la teneur en phosphore soluble en fonction des apports organiques dans les traitements fertilisés

En effet, le phosphore a probablement réagi avec les Ca²⁺ présents, d'où il y a formation de composés P-Ca insolubles, cette réaction été réalisée et favorisée par les conditions d'humidité, en effet le sol été maintenu à 2/3 de sa capacité de rétention tout au long de l'essai, Snyder et Staton (2002) montrèrent qu'après irrigation d'un sol basique

présentant une concentration élevée en Ca^{2+} , la plupart du phosphore se transforme en phosphates calciques insolubles, ce qui diminue la biodisponibilité de cet élément. Beaucoup d'auteurs ont montré que tous les sols fixent le phosphore. En effet, tous les sols ont un pouvoir fixateur vis à vis de cet élément (Morel, 1996), ce pouvoir varie d'un sol à un autre, et dépend de plusieurs facteurs (pH, des cations présents, de la teneur et du type de l'argile présente, ...). D'après les figures au-dessus, il est à noter que la quantité du phosphore soluble diminue graduellement avec la teneur en calcaire apporté. Les taux élevés de diminution de ces teneurs montrent qu'il y a une perte de solubilité et un changement de la forme du phosphore dans le sol. Cette perte de solubilité peut s'expliquer par l'insolubilisation du phosphore qui est de plus en plus importante que le taux de calcaire est élevé (50%). Ceci peut s'expliquer par la précipitation du phosphore sous forme de phosphate calcique en réagissant avec les cations Ca^{2+} provenant de calcaire. Panahi Kordlaghari (1997) affirme que quel que soit la source des Ca^{2+} (gypse ou calcite), ce dernier fixe les ions phosphates à condition que le pH soit élevé, condition de notre sol. Par ailleurs, l'utilisation des acides organique de notre expérimentation a montré une certaine amélioration de la teneur du sol en phosphore soluble que ce soit dans les traitements témoins sans apport d'engrais ou dans les traitements fertilisés (Fig. VI-5b et Fig. VI-6b). Cette amélioration est remarquée surtout dans le cas des traitements avec 50% CaCO_3 dont les combinaisons : Teneur en calcaire*différents traitements ont révélé des effets hautement significatifs pour les sols fertilisés avec MAP ($F=5,704$; $P = 0,04$). Par contre, des effets non significatifs ont été enregistrés dans le cas des témoins. Ceci explique l'effet bénéfique de l'application des acides organiques pour l'amélioration de la fertilité phosphatée des sols calcaires.

Le sol en présence de CaCO_3 , est encore plus riche en cations Ca^{2+} , vu la solubilité de ce minéral, l'insolubilisation du phosphore est accentuée. Le phosphore peut être insolubilisé par trois voies :

- Par fixation sur les sites du complexe adsorbant qui est enrichi par les cations Ca^{2+} , suite à la solubilisation du calcaire
- Par réaction avec les Ca^{2+} libres dans la solution du sol apportée par le calcaire.
- Par fixation sur la surface du calcaire.

Ceci est indiqué par Akinrami et Cho (1991), en travaillant sur l'insolubilisation du phosphore en présence de la calcite. Ils montrent que le phosphore réagit d'abord avec le

Ca²⁺ du complexe adsorbant, puis avec le Ca²⁺ libre de la solution du sol, ensuite avec le Ca²⁺ présent sur la surface de la calcite.

VI.3. Cinétique du phosphore dans le sol

La cinétique du phosphore dans le sol est effectuée en utilisant le model parabolique de diffusion suivant :

$$Q_t = Q_e + R\sqrt{t}$$

Où :

Q_t : Quantité de phosphore assimilable extractible avec un temps t (mg P kg⁻¹);

Q_e : Quantité de phosphore libéré en atteignant l'équilibre (mg kg⁻¹);

R : Constante de taux de diffusion du phosphore (mg P kg⁻¹ h^{-1/2}).

C'est une corrélation simple dans laquelle le phosphore assimilable est corrélé avec le temps (t) en utilisant la racine carrée de chaque durée d'incubation ($t^{1/2}$). Les paramètres du model parabolique utilisé pour décrire la cinétique du phosphore dans les sols sont mentionnés dans le tableau ci-après. Basé sur les valeurs relativement élevées de R^2 , le modèle de diffusion parabolique était considéré comme l'équation la plus appropriée décrivant la cinétique de P avec temps dans le sol. Une description réussie de la cinétique de P par la modèle d'équation parabolique a été signalé dans l'étude des Shariatmadari et *al.* (2006) et Jalali et Ranjbar (2010) sur certains sols calcaires de l'Iran. Comme indiqué dans le tableau VI-3, lorsque l'équation parabolique de diffusion a été employée pour l'établissement de la courbe de la cinétique de phosphore du sol, un niveau significatif a été atteint dans tous les cas ($P < 0,05$). Le paramètre R dans l'équation parabolique de diffusion représente le coefficient de diffusion relative du phosphore. Lu et *al.* (1998) a signalé que l'acide citrique et l'acide oxalique pourraient évidemment améliorer le coefficient de diffusion du phosphore dans le sol. Feng (2012) a trouvé qu'ajout d'acides organiques de faible poids moléculaire pourraient améliorer le coefficient de diffusion relative du phosphore dans le sol. Lv et *al.* (2015) ont ajouté que l'équation de diffusion parabolique a montré que les acides organiques peuvent améliorer le taux de migration de phosphore dans le sol. De ce fait, une faible concentration d'acides organiques dans les sols peuvent diminuer la concentration de phosphore et par conséquent, la vitesse de diffusion du P sera diminuer.

Tableau VI-3 : Les paramètres du model parabolique utilisé pour décrire la cinétique du phosphore dans les sols traités et non traité avec les acides organiques

Traitements		Coefficient de diffusion (R) (mg P kg ⁻¹ h ^{-1/2})	Quantité de P libéré (Qe) (mg P kg ⁻¹)	Coefficient de détermination (R ²)
Sans apport du calcaire (Témoin)	P0-E _b	-0,750	29,08	0,37
	P0-A _c	-0,909	33,27	0,44
	P0-A _o	-0,986	35,66	0,58
50% CaCO ₃	P0-E _b	-0,249	12,89	0,24
	P0-A _c	-0,413	17,22	0,69
	P0-A _o	-0,430	18,14	0,65

Avec P0 : Sol sans apport d'engrais (non fertilisé)

E_b, A_c et A_o désigne : Traitements irriguer par de l'eau distillée, par les solutions d'acide citrique et oxalique, respectivement.

"

D'après le tableau VI-3, le coefficient de diffusion (R) a enregistré toujours des valeurs négatives. Ce coefficient représente la perte de l'assimilabilité du phosphore avec le temps et peut être utilisé comme un indice de taux de transformation des ions phosphate dans un sol donné. Les valeurs de ce coefficient sont variables dans tous les traitements. Les plus faibles valeurs de l'ordre de -0,249 mg P kg⁻¹h^{-1/2} ont été enregistrés dans le cas du sol non fertilisé et sans apport d'acides organique (témoin). L'addition des acides organiques a augmenté les valeurs de R ainsi que la fraction disponible de phosphore du sol. Ces résultats montrent que les indices de transformation de P ont augmenté avec l'amélioration de la disponibilité du phosphore dans le sol provoquant une augmentation du nombre des sites d'adsorption. Les mêmes remarques ont été constatées par Mehrizi et al. (2015) dont ils ont trouvé que les indices de transformations du phosphore augmentent avec l'accroissement des apports phosphaté.

En ce qui concerne le deuxième paramètre "Qe" (quantité de phosphore libéré, mg kg⁻¹). Les plus faibles valeurs ont été enregistrées dans les traitements témoins. Cependant, les traitements fertilisés et irrigués par les acides organiques libèrent beaucoup de phosphore par rapport aux autres. Nos résultats rejoignent ceux obtenus par Lv et al. (2015) qui ont déclaré que les valeurs de Qe augmentent significativement avec l'application des acides organiques.

VI.4. Conclusion

Au terme de ce travail il parait nécessaire d'en obtenir des résultats essentiels. Rappelons que l'objectif principal de cette étude était d'étudier l'impact des apports organiques sous forme des acides organiques sur le devenir du phosphore apporté par le

MAP en suivant sa cinétique et d'évaluer les possibilités d'enrichissement d'un sol calcaire en phosphore assimilable en présence de ces acides organiques. Nous pouvons dégager que la cinétique des engrais phosphatés contribue à l'enrichissement du sol en phosphore assimilable, mais la faible solubilité du phosphore dans le sol est notamment due à son action lente dans le calcaire qui doit être certainement pris en considération dans une éventuelle fertilisation. L'addition des acides organiques provoque une augmentation de la teneur en phosphore lié au calcium pour les trois traitements. Cet aspect doit être pris en considération dans le calcul des doses d'engrais à apporter et pour le maintien de la teneur en phosphore des sols à un niveau acceptable puis que le phosphore lié au calcium peut contribuer à la nutrition des plantes suivant la solubilité des molécules phosphocalciques formées.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La faible quantité de minéraux assimilables dans les sols riches en calcaires reste l'un des problèmes majeurs pour la mise en valeur des sols dans les zones arides ; tel est le cas de nombreux sols en Algérie. Les sols alluvionnaires sont des couvertures pédologiques particulièrement recherchées par les agronomes. Malheureusement, ces sols sont beaucoup moins répandus et ils sont souvent riches en calcaire. De ce fait, leur mise en valeur agricole est tributaire de la correction de la forte déficience en minéraux assimilables y compris le phosphore.

Les différentes études ont permis de donner des réponses sur les relations qui peuvent exister entre le niveau de calcaire dans les sols de la vallée de l'Oued Righ et la problématique phosphoriques de ces sols. Pour ce faire, des expérimentations au laboratoire étaient conduites sur les deux types de sols sélectionnés pour atteindre les objectifs suivants :

- Modélisation de l'adsorption du phosphore dans les sols calcaires ;
- Caractérisation des indices de la sorption du phosphore : une approche pour prédire les besoins en phosphore des sols calcaires ;
- Développer des relations entre les niveaux de calcaire des sols et les besoins en phosphore calculés afin de pouvoir calculer les apports phosphatés à n'importe quel niveau de calcaire dans le sol.
- Etudier les effets des quelques combinaisons organominérales sur le statut du phosphore dans les sols riches en calcaire et d'en dégager celles susceptibles d'améliorer l'efficacité phosphorique dans les sols calcaires et de mettre à la disposition du blé du phosphore assimilable pour leur meilleur développement.

A l'issue des résultats de notre travail de recherche nous avons observé que le carbonate de calcium est considéré parmi les principaux facteurs de l'indisponibilité de P aux plantes par des réactions d'adsorption et de précipitation. Par conséquent, la fertilisation phosphatée de ces sols peut être rationalisée selon leurs teneurs en calcaire. Les isothermes d'adsorption étudiées montrent qu'un bon ajustement linéaire pour les données des deux sols étudiés a été observé et la bonté de l'ajustement du modèle a été

déterminée à partir de (R^2) valeurs indiquant la grande conformité des données avec les modèles d'adsorption employés.

Les isothermes de sorption du P par les sols étudiés présentent un aspect hyperbolique, dont les capacités d'adsorption du P aux sols ont augmenté régulièrement avec l'accroissement de la teneur des sols en calcaire total. Cette tendance pourrait être expliquée par des réactions d'adsorption et de précipitation qui auront lieu dans les sols riches en calcaire.

L'application de l'isotherme d'adsorption du phosphore était tout à fait efficace, par le fait que les caractéristiques de sorption de phosphore et les besoins en phosphore des sols pourraient mieux être déterminés en utilisant ces modèles d'adsorption plutôt que d'utiliser les autres approches classiques.

La sorption de phosphate a été utilisée dans notre recherche pour inclure tous les processus (adsorption et précipitations) ayant pour résultat le déplacement du phosphate des solutions. Dans notre étude, les valeurs minimales de la capacité de sorption ont été observées dans les sols traités avec les acides organiques de faible poids moléculaire "AOFPM". Cette remarque pourrait être expliquée par l'effet bénéfique des acides organiques qui rentrent en compétition avec les composants du sol responsable de l'adsorption du phosphore.

La capacité des acides organiques à réduire la sorption de P semble suivre l'ordre suivant : acides citrique > acide oxalique. Cela pourrait être probablement attribué aux hydroxyles acides comme les citrates qui peuvent former des complexes plus forts que ceux qui contiennent un seul groupe COOH. De ce fait, les acides organiques de faible poids moléculaire utilisées dans notre expérience ont le potentiel pour réduire la quantité de P nécessaire pour un développement optimum des cultures cela pourrait conduire à des avantages économiques (utilisation efficace et économique des engrais P).

L'appréciation de l'effet des doses d'engrais phosphaté, apporté en combinaison avec l'acide citrique et l'extrait du fumier, sur le comportement et la nutrition phosphatée du blé dur, nous a donné des résultats qui nous permettent de constater que l'effet des apports phosphatés ainsi que les traitements appliqués est non significatif sur les paramètres biométriques du blé. Quant à la nutrition phosphatée, les traitements et les apports du phosphore ont influencées positivement sur la teneur totale en phosphore du

blé, notamment avec l'utilisation combiné de l'acide citrique et le phosphore.

Les apports combinés d'engrais P avec les substances organiques (acide citrique et extrait de fumier) ont augmenté l'efficacité d'adsorption du P "EAP" de blé de l'ordre de : 50 à 73 % pour les traitements de l'extrait de fumier et de l'acide citrique, respectivement par rapport au témoin. L'efficacité d'utilisation de phosphore "EUP" est un indicateur important pour tenir compte de l'efficacité d'absorption de phosphore qui peut être calculée en divisant le rendement de la matière sèche produite sur la quantité de phosphore exporté. Nos résultats montrent que la combinaison d'engrais P avec des substances organiques pourrait accroître fortement les exportations de P par le blé, et par conséquence l'efficacité d'utilisation du P par le blé va diminuer avec le temps.

Rappelons que parmi les objectifs de cette recherche étaient d'étudier l'impact des apports organiques sous forme d'acide citrique et d'oxalique sur le devenir du phosphore apporté par l'engrais phosphaté dans notre sol en suivant sa cinétique en présence de ces acides organiques. Les résultats obtenus attestent que l'évolution des teneurs en phosphore assimilable dans le sol diminue au fil du temps. Cette cinétique décroissante de disponibilité du phosphore assimilable dans le sol peut être s'expliquer essentiellement par les prélèvements du phosphore par les plantes mais aussi elle peut être liée aux transferts du phosphore vers des formes inassimilables. Les combinaisons des engrais phosphatés avec les deux acides organiques (acide citrique et l'acide oxalique) ont exercé un effet très favorable sur la disponibilité du P dans le sol.

En outre, le modèle de diffusion parabolique était utilisé pour décrire la cinétique de P avec le temps dans le sol. L'ajout d'acides organiques de faible poids moléculaire a amélioré le coefficient de diffusion relative du phosphore dans le sol (paramètre "R" dans l'équation parabolique de diffusion). En ce qui concerne le deuxième paramètre "Qe" (quantité de phosphore libéré, mg kg⁻¹). Les plus faibles valeurs ont été enregistrées dans les traitements témoins. Cependant, les traitements fertilisés et traités par les acides organiques ont libéré beaucoup de phosphore par rapport aux autres. Cet aspect doit être pris en considération dans le calcul des doses d'engrais à apporter et pour le maintien de la teneur en phosphore des sols à un niveau acceptable puis que le phosphore lié au calcium peut contribuer à la nutrition des plantes suivant la solubilité des molécules phosphocalciques formées.

Perspectives...

Les résultats émanant de ce travail représentent ainsi une contribution à la connaissance des sols des régions arides et leur comportement vis-à-vis de la dynamique des éléments essentiels comme le phosphore. Une exploitation pratique de ce travail peut contribuer d'une manière très efficace dans le raisonnement de la fertilité phosphatée des sols et la rationalisation des pratiques agricoles. Toutefois, il est souhaitable d'envisager :

- La mise en œuvre de la modélisation de la dynamique du phosphore pour les sols du Sahara Algérien, en particulier les sols alluvionnaires à l'Oued Righ pour lesquels on dispose maintenant de données assez détaillées.
- Valider sur le terrain les comportements établis par :
 - La réalisation d'essais au champ, avec un suivi sur le long terme, de l'évolution de la dynamique du phosphore en fonction de la nature et la quantité des engrais apportés.
 - L'examen de l'effet de l'amendement organique sur la dynamique de cet élément.

À travers nos résultats et des autres recherches similaires nous pouvons effectuer un raisonnement de fertilisation phosphatée qui prend en compte la nature physico-chimique des sols du Sahara algérien notamment les accumulations calcaires. Les techniques de fertilisation préconisées sont celles qui permettent de réduire la rétrogradation, d'augmenter les rendements et de réduire ainsi le coût de production. Tous cela, dans le but d'assurer la rentabilité des cultures stratégiques comme le blé par une meilleure conduite culturale permettant une valorisation optimale des ressources hydro-édaphique et des apports fertilisants de type phosphaté. Aussi, les connaissances acquises par ce type de recherche servent à limiter l'action du calcaire sur la rétrogradation du phosphore et d'optimiser l'assimilation de ce dernier par les cultures en générale dans une perspective de développement durable de l'agriculture saharienne.

BIBLIOGRAPHIE

A

Abella SR. 2006. Estimating organic carbon from loss-on-ignition in northern Arizona forest soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 71: 545-550.

ABHS. 2006. Cadastre hydraulique du bassin hydrographique du Sahara septentrional, mission II : alimentation en eau potable et industrielle, 3- 4 p.

Acuña H, Inostroza L. 2012. Phosphorus efficiency of naturalized Chilean white clover in a grazed field trial. *Grass and Forage Science*. doi:10.1111/j.1365-2494.2012.00879.x.

Afif E, Matar A, Torrent J. 1993. Availability of phosphate applied to calcareous soils of west Asia and North Africa. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 57, 756-760.

Agbenin JO, Igbokwe SO. 2006. Effect of soil-dung manure incubation on the solubility and retention of applied phosphate by a weathered tropical semi-arid soil. *Geoderma* 133: 191-203.

Ahenkorah Y. 1968. Phosphorus retention capacities of some cocoa- growing soils of Ghana and their relationship with soil properties. *Soil Science*. 105 : 24-30.

Aissa AD, Mhiri A. 2001. Fertilisation phospho-potassique du blé dur en culture intensive en Tunisie. 5p.

Aissani R, Bettahar A. 2001. Fiche descriptive sur les zones humides RAMSAR. Circonscription des forêts d'Oued-Righ, Wilaya d'El Oued p1.

Aït Houssa A, Benbella M, Badraoui M. 2004. Éléments d'aide au raisonnement de l'échantillonnage du sol en parcelle agricole. *Revue H.T.E.* N° 129 - Juin 2004.

Aït Houssa A. 1989. Etude du potassium dans divers types de sol et systèmes de culture au Maroc. Thèses de Doctorat d'Etat ès Sciences Agronomiques. Rabat : IAV Hassan II, 145 p.

- Akinrami, Cho. 1991. Phosphate and accompanying cation transport in a calcareous cation exchangeresin system. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 55, 959-963.
- Alamgir M, Mc Neill A, Tang C, Marschner P. 2012. Changes in soil P pools during legume residue decomposition. *Soil Biology & Biochemistry.* 49, 70-77.
- Annichiarico P, Bellah F, Chiari T. 2005. Defining sub regions and estimating benefits for a specific adaptation strategy by breeding programs: A case study. *Crop Sci.*, 45: 1741-1749.
- ANRH. 2006. Agence Nationale des ressources Hydrauliques, étude sur la vallée de l'Oued Righ, 120p.
- Arvieu JC, Bouvier O. 1974. Les processus chimiques de l'évolution des phosphates en sol calcaire. *Bull AFES n°4* pp.207- 224.
- Arvieu JC. 1972. Contribution à la connaissance de l'évolution des engrais phosphatés en sol calcaire. Etude cinétique des réactions entre orthophosphates solubles et CaCO₃. Propriétés physico-chimiques des apatites phosphocalciques formées. Thèse doctorat univ. Nice INRA 151p.
- Arvieu JC. 1974. Les processus chimiques de l'évolution des phosphates en sols calcaires. *Sciences du Sol*, 4, 207-217.
- Arvieu JC. 1980. Réaction des phosphates minéraux en milieu calcaire ; conséquences sur l'état et la solubilité du phosphore. *Bull. Assoc. Fr. Etude sol*, 3, 179-189.
- Assimakopoulos I, Kosmas C, Nychas A, Bovis C. 1986. The effect of previous P addition on sorption indices of calcareous soils determined with commonly employed methods. *ZP flanzenernaehr Bodenk* 149 : 548-560.
- Ayodele O, Agboola AA. 1981. Evaluation of phosphorus fixation capacity of tropical savannah soils of western Nigeria. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 45 : 462-464.
- Azzaoui A, El Mourid M, Loudyi B, Ryan J. 1993. Fertilité et fertilisation potassique au Maroc : Acquis et perspectives d'avenir. *Al Awamia* 83 : 241-263.

B

Badraoui M, Souidi B, Monjahid Y, Bennani F, Mikou M, Bouhlassa S. 1995. Mineralogical consideration in soils fertility management in Marroco, Homes, terre et eaux, Marroco. (25) 100 : 80-88.

Bagnouls F, Gaussen H. 1953. Saison sèche et indice xérothermique. Doc. Pour la carte des productions végétales, vol. I, art. Toulouse. 47 p.

Baize D, Jabiol B. 1995. Guide de description des sols. Ed. AFES-INRA, Paris, 388p.

Baize D. 2000. Guide des analyses en pédologie, choix-expression, présentation interprétation. 2ème Ed INRA, Paris, 257p.

Barker AV, Pilbeam DJ. 2007. Handbook of plant nutrition. Books in soils, plants, and the environment; v. 117. 662p.

Barrow NJ. 1967. Effect of soil's buffering capacity for phosphate on the relation between uptake of phosphorous and the phosphorus extracted by sodium bicarbonate. J. Aust. Inst. Agric. Sci. 33 : 119-121.

Barrow NJ. 1973. Relationship between soils' ability to adsorb phosphate and the residual effectiveness of superphosphate. Aust. J. Soil Res. 11 : 57-63.

Barrow NJ. 1978. The description of phosphate adsorption curves. Journal of Soil Science 29 : 447-62.

Barrow NJ. 1989. Surface reactions of phosphate in soil. Agricultural Science. 2 : 33-37.

Baruah TC, Barthakur HP. 1997. A textbook of soils analysis. 2nd edition. New Delhi, India: Vikas Publishing House Private Limited. 334p.

Beaudin I. 2008. Revue de littérature. La mobilité du phosphore Version finale. Ed CRAAQ, Québec. 137p.

Beck MA, Sanchez PA. 1994. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a Typic Paleudult. Soil Sci. Am. J. 58 : 1424-1431.

Beckwith RS. 1965. Sorbed phosphate at standard supernatant concentration as an estimate of the phosphate needs of soils, *Australian J. Exp. Agri. An. Husb.*, 5 : 52-8

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

Bennoah EO, Acquaye DK. 1989. Phosphate sorption characteristics of selected major Ghanaian soils. *Soil Sci.*, 148 : 114-123.

Bhal GS, Toor GS. 2002. Influence of poultry manure on phosphate availability and the standard phosphate requirement of crop estimated from quantity-intensity relationship in different soils. *Bioresource technology* 85 : 317-322.

Black CD. 1965. Method of soil analysis. Part 1 and 2. USA: American Society of Agronomy: Madison, Wisconsin. 1572p.

Bloom PR, McBride MB, Weaver RM. 1979. Aluminum organic matter in acid soils buffering and solution Aluminum activity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43 : 488- 493.

Brinton W, Trankner A, Droffner M. 1996. Investigations into liquid compost extracts. *BioCycles*, 37 (11): 68-70.

Brookes PC, Powlson DS, Jekinson DS. 1984. Phosphorus in soil microbial biomass. *Soils boil. Biochem.* 14 : 319-329.

Bukman OC, Karsted O, Liew H, Richard I. 1990. Agriculture et fertilisation -les engrais et leur avenir. Edit. Taugen Grafiste Centre. Oslo. 258p.

C

Cajuste LJ, Laird RJ, Cajuste BL, Cuevas BG. 1996. Citrate and oxalate influence on phosphate, aluminum, and iron in tropical soils. *Commun Soil Sci Plant Anal.* 27: 1377-1386.

Campbell LB, Racz GJ. 1975. Organic and inorganic phosphorus content, movement and mineralization of phosphorus in soil beneath a feedlot. *Canadian Journal of Soil Science.* 55:457-466.

Castillo, C., Acuña, H., Zagal, E. and Inostroza, L. 2013. Phosphorus absorption and use

efficiency by Lotus spp. under water stress conditions in two soils: a pot experiment. *Chilean Journal of Agricultural Research* 73: 31-40.

Castro B, Torrent J. 1994. Phosphate availability in calcareous Vertisols and Inceptisols in relation to fertilizer type and soil properties," *Fertilizer Research*, vol. 40, n2, pp.109-119.

Chattha TH, Yousaf M, Javeed S. 2007. Phosphorus adsorption as described by freundlich adsorption isotherms under rained conditions of Pakistan. *Pak J Agri Sci.* 44: 551-556.

Chaudhry EH, Ranjha AM, Gill MA, Mehdi SM. 2003. Phosphorus requirement of maize in relation to soil characteristics, *International Journal of Agriculture and Biology*, vol.5, no. 4, pp. 625-629.

Ching PC, Barber SA. 1979. Evaluation of temperature effects on K uptake by corn, *Agron. J.*, 71 : 1040-1044.

Cieslinski G, Van Rees KC, Szmigieska AM, Krishnamurti GS, Huang PM. 1998. Low-Molecular-weight organic acids in rizosphere soils of durum wheat and their effect on cadmium bio accumulation. *Plant Soil.* 203 : 109-117.

Clément A. 1990. Etude de l'association de culture du maïs (*Zea mays* L.) et du soja (*Glycine max* L. Merr.) dans la vallée de Chitawan, Népal. Thèse Doctorat. 180p.

Condrón LM, Goh LM. 1989. Effect of long-term phosphatic fertilizer applications on amounts and forms of phosphorus in soils under irrigated pasture in New Zeland. *Jor of soil science*, 40 : 383-385.

Condrón LM, Turner BL, Cade-Menun BJ. 2005. Chemistry and dynamics of soil organic phosphorus. In : J.T. Sims and A.N. Sharpley, editors, *Phosphorus: Agriculture and the Environment*. ASA, CSSA, and SSSA. Madison, WI. p. 87-122.

Côte M. 1998. Des Oasis malades de trop d'eau ? In *Cahiers Sécheresse*, volume 9, N° 2, pp 123-130.

CPCS. 1967. La classification des sols. Chaire de pédologie, ENSA Grignon, 100p.

D

Day JH. 1983. The Canadian soil information system (CanSIS): manual for describing soils

in the field. Agriculture Canada Expert Committee on Soil Survey. Agric.Can., Res. Branch, Ottawa, Ontario.

De Os Horta 1979. Les encroûtements calcaires et les encroûtements gypseux engéotechnique routière. BET. Labo mécanique des sols, 105p.

Delgado A, Madrid A, Kassem S, Andreu L, Campillo MC. 2002. Phosphorus fertilizer recovery from calcareous soils amended with humic and fulvic acids. *Plant Soil* 245, 277-286.

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

Demolon A. 1968. Dynamique du sol. Ed. masson .520p.

Deng Y, Chen K, Teng W, Zhan A, Tong Y, et al. 2014. Is the Inherent Potential of Maize Roots Efficient for Soil Phosphorus Acquisition? *PLoS ONE* 9(3): e90287.

Deraoui BN, Halilat MT, Mekliche A. 2011. Effet d'un apport de phosphore sur une culture de blé tendre conduite en conditions irriguées. *Revue des Bioressources* 1(1) : 39-46.

Deraoui BN, Hanifi-Mekliche L, Mekliche A, Mihoub A, Daddi bouhoun M. 2015c. Effect of phosphorus application on durum wheat in alkaline sandy soil in arid condition of southern Algeria. *Asian Journal of Crop Science*, 7(1), 61-71.

Deraoui BN, Hanifi-Mekliche L, Mekliche A. 2015a. Effet de la nutrition phosphatée sur le rendement en grain et la concentration des grains en P, mg^{2+} et K^+ du blé. *Revue des Bioressources* 5(1) : 10-17.

Deraoui BN, Hanifi-Mekliche L, Mihoub A. 2015b. Effect of incubation period of phosphorus fertilizer on some properties of sandy soil with low calcareous content, Southern Algeria. *Asian Journal of Agricultural Research*, 9(3), 123-131.

Devau N, Hinsinger P, Le Cadre E, Colomb B, Gerard F. 2011. Fertilization and pH effects on processes and mechanisms controlling dissolved inorganic phosphorus in soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75, 2980-2996.

Devau N, Le Cadre E, Hinsinger P, Gerard F. 2010. A mechanistic model for

understanding root-induced chemical changes controlling phosphorus availability. *Annals of Botany* 105, 1183-1197.

Devau N, Le Cadre E, Hinsinger P, Jaillard B, Gerard F. 2009. Soil pH controls the environmental availability of phosphorus: Experimental and mechanistic modelling approaches. *Applied Geochemistry* 24, 2163-2174.

Dibbe B. 1973. Les carbonates des sols calcaires et leur comportement en présence de solution de phosphates de potassium. Thèse doctorat Université de Renne, 120p.

Djili K, Daoud Y, Ayache N. 1999. Analyse de la distribution verticale et spatiale du calcaire dans les sols de l'Algérie septentrionale. I.N.A.El Harrach, Alger, pp : 201- 213.

Djili K. 2000. Contribution à la connaissance des sols du Nord de l'Algérie. Thèse doc. INA, Alger, 243p.

Dodor DE, Oya K. 2000. Phosphate sorption characteristics of major soils in Okinawa, Japan; *Communications in Soil Science and Plant Analysis*; 31:277-288.

Doré T, Le Bail M, Martin P, Ney B, Rogerestrade J. 2006. L'agronomie aujourd'hui. Ed. Quae. 367p.

Drew MC. 1975. Comparison of effects of a localized supply of phosphate, nitrate, ammonium and potassium on growth of seminal root system, and shoot, in barley. *New Phytologist* 75, 479-490.

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

Dubief J. 1952. Le vent et le déplacement du sable au Sahara. *Travaux de l'Institut de Recherches Sahariennes. Tome VII. N° spécial. Université d'Alger*, pp 123 - 164.

Dubost D. 1991. *Ecologie, Aménagement et Développement Agricole des Oasis Algériennes. Thèse de doctorat. Tome 3. Université François Rabelais de Tours U.F.R d'Aménagement et de Géographie (France)*, 544 p.

Dubost D. 2002. *Ecologie, Aménagement et Développement Agricole des Oasis Algériennes. Edition: C.R.S.T.R.A*, 423 p.

Dubus IG, Becquer T. 2001. Phosphorus sorption and desorption in oxide-rich Ferralsols of New Caledonia. *Australian Journal of Soil Research* 39: 403-414.

Dubus L. 1997. La rétention du phosphore dans les sols: principes d'étude, modélisation, mécanismes et compartiments du sol impliqués. Ed. ORSTOM Nouméa, Doc. Sci de la terre-agropédologie II3. 78p.

Duffera M, Robarge WP. 1999. Soil characteristics and management effects on phosphorus sorption by highland plateau soils of Ethiopia. *Soil Science Society of America Journal* 63: 1455-1462.

Dusberg JM, Smith MS, Doran JW. 1989. In Dynamics of SOM in Tropical Ecosystems. Univ. of Hawaii, USA.

Duthil J. 1973. Eléments d'écologie et d'agronomie. T II. Ed. J.B. Baillière, Paris, 263 - 656.

Dutil P. 1973. Élément d'écologie .Ed. J.B. TIL Paris. p155-452.

Duthil P. 1976. La fertilité phosphatée des sols calcaires. *Ann. Agron., INA Alger*, 6(2) : 75-80.

E

Enwezor WO, Ohiri AC, Opuwaribo EE, Udo EJ. 1990. Literature Review on Soil Fertility Investigation in Nigeria. Lagos: Federal Ministry of Natural Resources.

Estefan G, Sommer R, Ryan J. 2013. Methods of Soil, Plant, and Water Analysis : A manual for the West Asia and North Africa region. 3rd edition. International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA), Beirut, Lebanon. p 244.

Evers GW. 2002. Ryegrass-Bermuda grass Production and Nutrient Uptake when Combining Nitrogen Fertilizer with Broiler Litter. *Agron. J.* 94:905-910 905-910.

F

Falisse A, Lambert J. 1994. La fertilisation minérale et organique in *Agronomie moderne*, pp 379 à 398.

- FAO. 2005. Utilisation des engrais par culture en Algérie. F.A.O. Rome, 61p.
- FAO. 2014. Bulletin de la FAO sur l'offre et la demande de céréales
<http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/fr>
- Fardeau JC, Morel C, Boniface R. 1988. Phosphore assimilable des sols. Quelle méthode choisir en analyse de routine? *Agronomie* 8 : 577-584.
- FAO. 1998. World Reference Base for Soil Resource. World Soil Resource Report N° 84. ISSS, ISRIC and F.A.O. Rome, 88p.
- Fardeau JC. 1993. Le devenir du phosphore dans le sol et dans les systèmes sol plante. *Perspectives agricoles* n°:181-juin, pp : 17-22.
- Fitter AH, Sutton CD. 1975. The use Freundlich isotherm for soil phosphate sorption data. *Journal of Soil Science* 26:241-246.
- Fitter AH. 1992. *Roots In the soil*. Harper-Collins publisher's pp. 49-54.
- Fox RL, Kamprath EJ. 1970. Phosphate sorption isotherm for evaluating the phosphate requirement of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34:902-907.
- Fox RL. 1981. External phosphorous requirements of crops. *Soil testing and plant analysis* (3rd ed). Madison, Wisconsin: SSSA book Ser. SSSA.
- Fox TR, Camerford NB, McFee WW. 1990. Phosphorus and aluminum release from a spodic horizon mediated by organic acids. *Soil Science Society of America Journal*. 54: 1763-1767.
- Frossard E, Brossard M, Hedley MJ, Metherell A. 1995. Reactions controlling the cycling of P in soils. Dans: *Phosphorus in global environment*, édité par T. H., tome 54, pages 108-137. John Wiley & Sons Ltd., Paris.
- Frossard E, Julien P, Neyroud JA, Sinaj S. 2004. Le phosphore dans les sols. État de la situation en Suisse. *Cahier de l'environnement* n° 368. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne. 180 p.
- Frossard E. Condron LM. Oberson A, Sinaj S, Fardeau JC. 2000. Processes governing

phosphorus availability in temperate soils. *J. environ. Qual.* 29: 15-23.

Furihata T, Suzuki M, Sakurai H. 1992. Kinetic characterization of two phosphate uptake systems with different affinities in suspension-cultured *Catharanthus roseus* protoplasts. *Plant Cell Physiology* 33: 1151-1157.

G

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

Gachon L. 1973. Vieillessement de divers engrais phosphatés en relation avec le type de sol étudié par la méthode Chang-Jackson. *Ann. Agon.*24 (5), 585-613.

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

Gagnon E, Beaulieu R. 2002. Utilisation du phosphore dans les engrais de démarrage. *Min. env. S.A.A.A.C. Quebec.*26p.

Gang Xu, Shao Hongbo, Xu Rongfu, Yuanyuan Nie, Yue Pei, Zhijun Sun, Blackwell MSA. 2012 The role of root-released organic acids and anions in phosphorus transformations in a sandy loam soil from Yantai, China. *Afr J Microbiol Res.* 6: 674-679.

Gee GW, Bauder JW. 1986. Particle-size analysis. In *Methods of soil analysis: Physical and mineralogy methods (Part I. 3rd ed)*. A. Klute, 383-412. Madison, Wisconsin: ASA and SSSA.

Geelhoed JS, Van Riemsdijk WH, Findenegg GR. 1999. Simulation of the effect of citrate exudation from roots on the plant availability of phosphate adsorbed on goethite. *European Journal of Soil Science* 50, 379-390.

Gerke J, Beißner L, Römer W. 2000. The quantitative effect of chemical phosphate mobilization by carboxylate anions on P uptake by a single root. I. The basic concept and determination of soil parameters. *J. Plant Nutr. Soil Sci* 163: 207-212.

Gervy R. 1970. Les phosphates et l'agriculture. Ed. Dunod. Paris 298p.

Ghazanshahi D, Jaouich A. 2001. Effet du pH sur la solubilité du phosphore dans les sols

calcaires du nord de Varamine (Iran). *Agrosol*. 12 (1) : 21-24.

Gichangi E M, Mnkeni PNS. 2009. Effects of goat manure and lime addition on phosphate sorption by two soils from the Transkei Region, South Africa. *Commun. Soil Sci. Plan. Anal.* 40(21-22), 3335-3347.

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

Giroux M, Tran TS. 1994. Étude des facteurs affectant l'évolution des teneurs en P et K des sols agricoles. *Agrosol* 7 (2) : 23-30.

Giroux MD, Bernier, Émond C. 1996. Utilisation agronomique et environnementale judicieuse des engrais phosphatés selon les caractéristiques des sols et des engrais, Dans Colloque sur la fertilisation intégrée des sols, CPVQ inc., p. 49-64.

Grant CS, Bittman M, Montreal C, Plenchette C, Morel. 2004. Soil and fertilizer phosphorus: Effects on plant P supply and mycorrhizal development. *Canadian. J. Plant Sci.* 85(1): 3-14.

Greenwood NN, Earnshaw A. 1984. *Chemistry of the elements*. Butterworth Heinemann Ltd, London. 1543 pages.

Gregory TR, Chelsey LK, Shimizu KD. 2005. A critical examination of the use of the Freundlich isotherm in characterizing molecularly imprinted polymers (MIPS). *Analytica Chemica Acta* 528:107-13.

Griffin RA, Jurinak JJ. 1974. Kinetics of the phosphates interaction with calcite. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 38: 75-79.

Grinev EI. 1969. Irrigation, drainage et la productivité des palmeraies de l'Oued-Righ. Thème N°1 de la mission Soviétique à la station expérimentale de Sidi-Mehdi, Touggourt, 116 p.

Gros A. 1979. *Engrais. Guide pratique de la fertilisation*. Ed la maison rustique Paris 382p.

Guppy CN, Menzies NW, Moody PW, Blamey FPC. 2005. Competitive sorption reactions

between phosphorus organic matter in soil: A review. *Aust. J. Soil Res* 43: 189-202.

H

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

Halajnia A, Haghnia GH, Fotovat A, Khorasani R. 2009. Phosphorus fractions in calcareous soils amended with P fertilizer and cattle manure. *Geoderma* 150 209-213.

Hanway JJ, Olson RA. 1980. Phosphate nutrition of corn, sorghum, soybeans, and small grains. In: Khasawneh, Sample, Kamprath, Eds. *The Role of Phosphorus in Agriculture*.

Harrison AF. 1987. Soil organic phosphorus: a review of world literature. *CAB International, Wallingford.* 257p.

Harrold SA, Tabatati MA. 2006. Release of Inorganic Phosphorus from soils by Low-Molecular-Weight organic acids. *Communications in Soil Science and Plant Analysis.* 37: 1233-1245.

Hassan MM, Rashid A, Akhtar MS. 1994. Phosphorus requirement of maize and sunflower on selected bench mark soils of Pakistan. In *Proc. 4th Nat. Cong. Soil Sci. May 24-26, 1992 at NARC, Islamabad*, pp: 327-332.

Haynes RJ. 1990. Active ion uptake and maintenance of cation-anion balance: A critical examination of their role in regulating rhizospheric pH. *Plant and Soil.* 26: 247-264.

Hedley MJ, Stewart JWB, Chauhan BS. 1982. Changes in inorganic and organic fractions induced by cultivation practices and laboratory incubations. *American journal of soil science,* 46: 970-976.

Heidi MW, He Z, Erich MS. 2011. Effects of poultry manure amendment on phosphorus uptake by rye grass, soil phosphorus fraction and phosphatase activity. *Boil. Fertile. Soils* 47 (4): 407-418

Holford I. 1997. Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. *Aust. J. Soil. Res.*; 35: 227-239.

Holford ICR, Mattingly GEG. 1975. The high and low energy phosphate adsorbing surfaces in calcareous soils. *Journal of Soil Science* 26:407-417.

Holford ICR, Mattingly GEG. 1976. A model for the behavior of labile phosphates in soil. *Plant Soil*. 44:219-229.

Holford ICR. 1989. Phosphorous behavior in soils. *Agri. Sci.* 12: 15-20.

Hopkins B, Ellsworth J. 2005. Phosphorus availability with alkaline/calcareous soil. *Western Nutrient Management Conference*. Vol. 6. Salt Lake City, UT.

Hopkins WG. 2003. *Physiologie végétale*. Ed. de Boeck, Belgique, 514p.

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

Hu H, Tang C, Rengel Z. 2005. Influence of phenolic acids on phosphorus mobilisation in acidic and calcareous soils. *Plant and Soil*. 268 : 173-180.

Huang Q, Zhao Z, Chen W. 2003. Effects of several low-molecular weight organic acids and phosphate on the adsorption of acid phosphatase by soil colloids and minerals. *Chemosphere*. 52(3): 571-578.

Hussain A, Abdul Ghafoor, Anwar-Ul-Haq M, Nawaz M. 2003. Application of the Langmuir and Freundlich Equations for P Adsorption Phenomenon in Saline-Sodic Soils. *International journal of agriculture & biology* 5:1560-8530.

I

Ingham ER. 2002. *The Compost tea-brewing manual*. Third Edition. Soil Food web Inc, Corvallis, Oregon, USA, 78 pp.

Iyamuremye F, Dick RP, Baham J. 1996. Organic amendments and phosphorus dynamics: II. Distribution of soil phosphorus fractions. *Soil Science* 161:436-443.

Iyamuremye F, Dick RP. 1996. Organic amendments and phosphorus sorption by soils.

J

Jackman JM, Jones RC, Yost RS, Babock CJ. 1997. Rietveld estimates of mineral percentages to predict phosphorous sorption by selected Hawaiian soils. *Soil Science Society of America Journal* 61:618-629.

Jaillard B, Hinsinger P. 1993. Alimentation minérale des végétaux dans le sol. *Techniques Agricoles*. 1210.

Jalai M, Ranjbar F. 2010. Aging effects on phosphorus transformation rate and fractionation in some calcareous soils. *Geoderma*. 155,101- 106.

Jalali M. 2006. Soil phosphorous buffer coefficient as influenced by time and rate of P addition. *Arch. Agron. Soil Sci.* 52, 269-279.

Javid S, Rowell DL. 2002. A laboratory study of the effect of time and temperature on the decline in Olsen P following phosphate addition to calcareous soils. *Soil Use Manage.* 18, 127-134.

Johnson AE. 2000. Soil and plant phosphate. Edts International Fertilizer Industry Association. 46 p.

Jones DL, Oburger E. 2011. Solubilization of phosphorus by soil microorganisms. In: E.K. Bünemann, A. Oberson, E. Frossard (eds), *Phosphorus in action. Biological Processes in Soil Phosphorus*, 169-198. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

Jones DL. 1998. Organic acids in the rhizosphere - a critical review. *Plant and Soil* 205: 25-44.

Jones JP, Singh BB, Fosberg MA, Falen AL. 1979. Physical, chemical and mineralogical characteristics of soils from volcanic ash in northern Idaho. II. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 547-552.

Jung J. 1983. Use of various phosphate fertilizer sources according to soils and crops. In 3rd International Congress on Phosphorus Compounds. Brussels, October 4-6 1983.

Juo ASA, Fox AL. 1977. Phosphate sorption capacity of some benchmark soils in West Africa. *Soil Sci.* 143: 370-376.

K

Kamprath EJ, Watson ME. 1980. Conventional soil and tissue test for assessing the phosphorus status of soils. In F.E. Khawsaneh et al. (Ed). *The role of phosphorus in agriculture.* Soil Sci. Soc. Am. Madison, WI. USA. pp. 433- 469.

Kelly JM, Parker GR, Mcfee WW. 1979. Heavy metal accumulation and growth of seedling of five species as influenced by soil cadmium level. *J. Environ. Qual.* 8(3): 361-364.

Khademi Z, Jones DL, Malakouti MJ, Asadi F, Ardebili M. 2009. Organic acid mediated nutrient extraction efficiency in three calcareous soils. *Australian J Soil Res.* 47: 213-220.

Khadraoui A. 2005. *Eaux et sol en Algérie. Gestion et impact sur l'environnement. Recueil de communications.* A.N.R.H. Ouargla Algérie, 392 p.

Khan MA, Kim S W, Rao RAK. 2010. Adsorption studies of Dichloromethane on some commercially available GACs: effect of kinetics, thermodynamics and competitive ions. *Journal of Hazardous Materials* 178 : 963-972.

Kim JH, Feagley SEJ. 1998. Adsorption and leaching of Tri flouralin, metolchlor and Metribuzin in a commerce soil. *Environ. Sci. Health, Part B- Pesticides. Food Contam Agric Waste.* 33: 529-546.

Kirk GJD, Nye PH. 1986. A simple model for predicting the rate of dissolution of sparingly soluble calcium phosphates in soils. I. The basic model. *Journal of Soil Science,* 37: 541-554.

Kuo S, Lotse EG. 1974. Kinetics of phosphate adsorption and desorption by hematite and gibbsite. *Soil Science.* 116:400-406.

Kuo S, Lotse EG. 1974. Kinetics of phosphate adsorption and desorption by lake sediments. *Soil Sci Soc Am Proc.* 38: 50-54.

L

Lajtha K, Bloomer SH. 1988. Factors affecting phosphate sorption and phosphate retention in a desert ecosystem. *Soil Science.* 146:160-167.

- Lambert JC. 1979. La fertilisation phosphatée. *Revue cultivars*. N° 115, pp : 96-97.
- Lan M, Comerford NB, Fox TR. 1995. Organic anions effect on phosphorus release from spodic horizons. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1745-1749.
- Leaver J, Russell P. 1957. The reaction between phosphate and phosphate fixing soils. *Journal of Soil Science*. 8:113- 126.
- Legros JP. 2007. *Les grands sols du monde*. Presses polytechniques et universitaires romandes. Espagne. 574 p.
- Li HG, Shen JB, Zhang FS, Lamber H. 2010. Localized application of soil organic matter shifts distribution of cluster roots of white lupin in the soil profile due to localized release of phosphorus. *Ann. Bot* 105: 585-593.
- Lindsay WL, Moreno EC. 1960. Phosphate phase equilibrium in soils. *Soil Sci Soc Am Proc.* 24:177-82.
- Lindsay WL. 1979. *Chemical equilibrium in soils*. John Wiley and Sons, NY, USA, p. 129.
- Liu G, Li J, Li Z. 1998. Effect from horizontally dividing the root system of wheat plants having different phosphorus efficiencies. *Journal of plant nutrition*, 21 (12) : 2535-2544.
- Loganathan P, Isirimah NO, Nwachuku DA. 1987. Phosphorus sorption by Ultisols and Inceptisols of the Niger delta in southern Nigeria. *Soil Sci.*, 144 :330-33.
- Loneragan JF, Asher CJ. 1967. Response of plants to phosphate concentration in solution culture II. Rate of phosphate absorption and its relation to growth. *Soil Sci.*103, 311-31.
- Lopez-Bellido FJ, Lopez-Bellido L, Lopez-Bellido RJ. 2005. Competition, growth and yield of faba bean (*Vicia faba*, L.). *European journal of agronomy*. 23 : 359-378.
- Lopez-Hernandez D, Coronel I, Alvarez L. 1987. The external phosphate requirement of cowpea on five dissimilar soils. *Soil Sci.* 144 :339-343
- Loué A 1987. *Les oligo-éléments en agriculture*. Ed. Nathan, Paris, 577p.
- Lozet J, Mathieu C. 1990. *Dictionnaire de science du sol*. 2ème éd. Tec.et Doc. Lavoisier .384p.

Luttmerding HA, Demarchi DA, Lea EA, Meidinger DV, Vold T. 1990. Describing ecosystem in the field. 2nd ed. B.C. Minist. Environ. and B.C. Minist. For., Victoria, British Columbia.

Lv Y C, Xu G, Sun J N, Brestič M, Živčák M, Shao H B. 2015. Phosphorus release from the soils in the Yellow River Delta : dynamic factors and implications for eco-restoration. *Plant Soil Environ.* Vol. 61, No. 8 : 339-343.

M

Mackay AD, Barber SA. 1984. Soil temperature effects on root growth and phosphorus uptake by corn, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48 : 818-823.

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

Marschner H. 1998. Role of root growth, arbuscular mycorrhiza, and root exudates for the efficiency in nutrient acquisition. *Fields Crops Research* 56 : 203-207.

Marschner, H., 1995. Mineral nutrition of higher plants ; 2nd Ed. Academic press, London, pp: 265-267.

Mathieu C et Lozet J. 2002. Dictionnaire de sol. 4^{ème} Ed. Lavoisier, Paris.

Mckenzie RA, Prent LE, Macleod JA. 2003. Influence of soil texture on fertilizer and soil phosphorus transformation in Gleysolic soils. *Can.j.soil.sci.soc.* 81 : 395- 403.

McLaughlin JR, Ryden JC, Syers JK. 1977. Development and evaluation of a kinetic model to describe phosphate sorption by hydrous ferric oxide gels. *Geoderma.* 18 : 295-307.

Mehdi SM, Abid M, Sarfraz M, Hafeez M, Hafeez F. 2007. Wheat response to applied phosphorus in Light Textured Soil in *Journal of Biological Sciences* 7 (8). Ed. Asian Network for Scientific Information : 1535-1538.

Mehdi SM, Rehaman O, Ranjha AM, Akhtar J. 2008. Phosphorus fertilizer recommendations for fodder based cereal crops. *Soil and Environment* 27 : 155-165.

Mehrizi Hejazi M, Sarcheshmehpour M, Ebrahimi Z. 2015. The effects of some humic substances and vermicompost on phosphorus transformation rate and forms in a calcareous soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15 (1), 249-260.

Mei Y, Yang XY, Guo YN, He J, Jiang R, Li YQ, Li JQ. 2012. Thermodynamic and kinetics studies of the adsorption of phosphorus by bioretention media. *Thermal Science*. 16: 1506-1509.

Mengel K, Kirby EA. 2001. Chapter 9 Phosphorus. In *Principles of plant nutrition*. 5 th edition. ed. Kluwer Academic Publishers. pp : 453:479.

Mengel K. 1997. Agronomic measures for better utilization of soil and fertilizer phosphates. *European Journal of Agronomy* 7: 221-233.

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

Messahel M, Meza N. 2004. Evaluation des eaux de la nappe phréatique et profondeur du drainage dans les terres irriguées en milieu saharien. *La Houille Blanche* 4 : 25-28.

Messar EM. 1996 Le secteur phoenicicole algérien : Situation et perspective à l'horizon 2010. Le palmier dattier dans l'agriculture d'Oasis des pays méditerranéens. Série A: Séminaire Méditerranéennes, N°. 28, Options méditerranéennes, CIHEAM, pp 23 - 36. Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche. Institut National des Recherche Agricoles du Bénin. Centre des Recherches Agricoles du Sud-Niaouli, Attogon, Bénin, 59 p.

Michel Ca, Thiens Sj. 2003. Phosphorus bioavailability following incorporation of grain manure crops. *Soil.sci.soc.Am.j.V67*: 1186-1194.

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

Mihoub A, Daddi Bouhoun M, Asif N, Saker ML. 2016b. Low-molecular weight organic acids improve plant availability of phosphorus in different textured calcareous soils, *Archives of Agronomy and Soil Science*, DOI:10.1080/03650340.2016.1249477.

Mihoub A, Daddi Bouhoun M, Saker ML. 2016a. Phosphorus adsorption isotherm: A key

aspect for effective use and environmentally friendly management of phosphorus fertilizers in calcareous soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47(16), 1920-1929.

Mihoub A, Deraoui BN. 2014. Performance of Different Phosphorus Fertilizer Types on Wheat Grown in Calcareous Sandy Soil of EL-Menia, Southern Algeria. *Asian Journal of Crop Science* 6 : 383-391.

Mkhabelaa MS, Warman PR. 2005. The influence of municipal solid waste compost on yield, soil phosphorus availability and uptake by two vegetable crops grown in a Pugwash sandy loam soil in Nova Scotia. *Agr. Ecosys. Environ.* 106 : 57-67.

Morais FI, Martins JR, Teizeira JF, Neto A, Couto WS. 1996. Adsorption of phosphorus in a plinthic soil of the Ilha de Marago. PA. *Boletim- da-Faculdade-de-Ciencias-Agrarias-do-Para.* 26 : 67-76.

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

Morel R. 1996. *Les sols cultivés*. Lavoisier, deuxième édition. 378 pages.

Muljadi DA, Posner H, Quirk JP. 1966. The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite, gibbsite and pseudobohemite. I, II and III. *Journal of Soil Science.* 17: 212-247.

Mullen LC. 2003. *Phosphorus Nutrition for Winter Crops*. Agfact P1.4.5, second edition. District Agronomist, Dubbo NSW Agriculture. 16p.

Murphy J, Riley JP. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters, *Analytica Chimica Acta* 27 : 31-36.

N

Nations Unies. 2002. *Rapport du Sommet mondial pour le développement durable*. Johannesburg (Afrique du Sud), 26 août-4 septembre 2002 (format pdf). 198p.

Nesson C. 1978. L'évolution des ressources hydrauliques dans les oasis du Bas Sahara algérien. In : *Recherche sur l'Algérie*, (ed. CNRS), pp 7-100, Paris.

Nisar A, Malik D M, Jalil A. 1991. Phosphorus recommendations based on soil test crop

response calibration. Islamabad, Pakistan : Tech. Bull. 8/91. NFDC.

Nziguheba G, Palm CA, Buresh R. J, Smithson PA. 1998. Soil phosphorus fractions and adsorption as affected by organic and inorganic sources. *Plant and Soil* 198 : 159-168.

O

Office National de météorologie (ONM). 2014 : Données météorologiques de la région de Touggourt. Station de Touggourt.

Olsen SR, Sommers LE. 1982. Phosphorus. In: Page AL, et al (eds), *Methods of Soil Analysis, Part 2*, 2nd edn, Agron Monogr 9. ASA and ASSA, Madison WI, pp 403-430

Olsen SR, Watanabe FS. 1957. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soils as measured by the Langmuir isotherm. *Soil Sci. Soc. Am.* J.21: 144- 418.

Olsen SR, Watanabe FS. 1965. Diffusion of phosphorus as related to soil texture and plant uptake. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 27: 648-653.

ONFAA. 2015. Bilan de la campagne céréalière 2014/2015. 11 p (Format pdf).

Otani T, Ae N. 1996. Sensitivity of phosphorus uptake to changes in root length and soil volume. *Agron. J.*, 88: 371-375.

Owusu-Bennoahe O, Acquaye DK. 1989. Phosphorus sorption characteristics of selected major Ghanaian soils. *Soil Sci.*, 148:114-123.

P

Panahi Kordlaghari M. 1997. The effect of gypsum on the sorption reaction of phosphate in some calcareous soils. These. PHD.Uni pf reading. dpt. soil.sci.

Parent LÉ, Khiari L. 2003. Nitrogen and phosphorus indicators of organic soil quality. Chap. 5 dans : Parent L. É. and P. Inicki (Éditeurs). *Organic soils and peat materials for sustainable agriculture*. CRC Press, Boca Raton, FL.

Pellerin A, Parent LÉ, Fortin J, Tremblay C, Khiari L, Giroux M. 2006. Environmental Mehlich-3 soil phosphorus saturation indices for Quebec acid to near neutral mineral soils varying in texture and genesis. *Can. J. Soil Sci.* 86 : 711-723.

Pellerin F, Pellerin S, Vilette C, Boiffin J. 2000. Evolution du raisonnement de la fertilité phosphatée des grandes cultures. Etude par simulation de l'évolution des préconisations de

fumure sur un échantillon test représentatif des sols et des successions de culture de Nord du Bassin Parisien. *Etude et gestion des sols* 7,53-71.

Pellerin S, Mollier A, Plénet D. 2000. Phosphorus deficiency affects the rate of emergence and number of maize adventitious nodal roots. *Agronomy Journal* 92: 690-697.

Pereda Campos MV. 2008. Contribution à l'étude des transporteurs de phosphate de la famille PHT1 chez le Peuplier (*Populustrichocarpa* Torr. & Gray) et le champignonectomycorhizien *Laccariabicolor* (Maire) P. D. Orton. Thèse de doctorat. Biologie Végétale et Forestière. Nancy (France), 141p.

Perennes JJ. 1979. Structures agraires et décolonisations - Les Oasis de l'Oued Righ (Algérie). Office des publications universitaires, Hydra, Alger Edition N° 345 - 09/79. 372 p.

Pierzynski GM, Sims JT, Vance G. 2000. Soils and environmental quality. 2nd ED, CRC. Pres. Newyork. 459p.

Pinerio AL, Cabera D, Pena D. 2009. Phosphorus Adsorption and fractionation in a two-phase olive mill waste amended soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73, 1539-1544.

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

Priya P, Sahi SV. 2009. Influence of phosphorus nutrition on growth and metabolism of Duo grass (*Duo festulolium*). *Plant Physiology and Biochemistry* 47 31-36.

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

Q

Quiquampoix H, Mousain D. 2005. Enzymatic Hydrolysis of Organic Phosphorus. In: Turner, B.L., Frossard, E., Baldwin, D.S., (Eds.), *Organic Phosphorus in the Environment*. CABI Publishing, 875 Massachusetts Avenue, Cambridge, USA, 89-112.

R

Ramade F. 2008. Dictionnaire encyclopédique des sciences de la nature et de la biodiversité. Ed. Dunod, Paris, 737p.

Ramaekers L, Remansb R, Raoc IM, Blairc M, Vanderleydena J. 2010. Strategies for

improving phosphorus acquisition efficiency of crop plants. *Field Crops Research* 117, 169-176.

Rashid A, Bughio N. 1993. Evaluating internal phosphorus requirement of rapeseed, chickpea, lentil and wheat by seed analysis. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 24:1359-1369.

Raturi S, Islam KR, Carroll M J, Hill R L. 2004. Thatch and soil characteristics of cool and warm season turfgrass. *Commun. Soil Sci. Plant. Anul.* 35. 2161-2176.

Reuter DJ, Edwards DG, Wilhelm NS. 1997. Temperate and Tropical Crops. In *Plant Analysis: An Interpretation Manual*. Eds DJ Reuter, JB Robinson. p83-253. CSIRO Publishing, Melbourne.

Richardson AE, Simpson RJ. 2011. Soil microorganisms mediating phosphorus availability. *Plant Physiol*, 156 : 989-996.

Robbins CW, Westerman DT, Freeborn LL. 1999. Phosphorus forms and extractability from three sources in recently exposed calcareous subsoil. *Soil Science Society of America Journal* 63:1717-1724.

Ruellan A. 1976. Caractéristiques morphologiques des sols calcaires. *Ann. Agro. INA., El-Harrach. Vol. IV , n°1, pp :31-54.*

Ruellan A. 1976. Morphologie et répartition des sols calcaires dans les régions méditerranéennes et désertiques. *O.R.S.T.O.M, n° 8617, Maroc, pp 272 -300.*

Ruellan A. 1984. Les sols calcaires : les principaux travaux des pédologues français. *AFES. Livre jubitaire du cinquantaine, pp 111-121.*

Ryan PR, Delhaize E, Jones DL. 2001. Function and mechanism of organic anion exudation from plant roots. *Annual Review Plant Physiology and Plant Molecular Biology.* 52 : 547-560.

S

Sadzawka A, Carrasco M, Demanet R, Flores H, Grez R, Mora ML, Neaman A. 2007. *Métodos de análisis de tejidos vegetales. 2ª ed. Serie Actas INIA N° 40. 140 p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Santiago, Chile.*

Samadi A, Gilkes R.J. 1999. Phosphorus transformations and their relationships with calcareous soil properties of southern Western Australia. *Soil Science Society of America*

Journal 63 : 809-815.

Samadi A. 2001. Changes in added available phosphorus with time in contrasting calcareous soils with a Mediterranean type of climate, in Proceedings of the 7th International Meeting on Soils with a Mediterranean Type of Climate, pp. 231-234, Bari, Italy, 2001.

Samadi A. 2006. Phosphorus sorption characteristics in relation to soil properties in some calcareous soils of Western Azarbaijan province, Journal of Agricultural Science and Technology 8:251-264.

Sanchez PA, Uehara G. 1980. Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. p. 471-513. In: F.E. Khasawneh et al. (ed.) Proc. on the role of phosphorus in agriculture. June 1-3, 1976. ASA, CSSA and SSSA, Madison, WI, USA.

Sanyal SK, Datta SK, Chan PY. 1993. Phosphate sorption-desorption behavior of some acidic soil of south and south-east Asia. Soil Science Society of America Journal 25 : 937-945.

Saxena MC. 1979. Importance of phosphorus in balanced fertilization of some food crops in west Asia and North Africa. In Phosphorus in agriculture. Proceedings of the ISMA Symposium held in Mohammedia, Morocco 13-14 March 1979. pp. 133-145.

Schachtman DP, Reid RJ, Ayling SM. 1998. Update on phosphorus uptake. Phosphorus uptake by plants : from soil to cell. Plant Phys. 116, 447-453.

Schaefer J, Stejskal EO. 1976. Carbon-13 nuclear magnetic resonance of polymers spinning at magic angle. Journal of American Chemical Society, 98, 1031-1032.

Schofield RK. 1955. Can a precise meaning be given to available soil phosphorus? Soil Fertilizers. 18 : 373-375.

Shariatmadari H, Shirvani M, Jafari A. 2006. Phosphorus release kinetics and availability in calcareous soils of selected arid and semiarid toposequences. Geoderma. 132, 261-272.

Sharif M, Sartr MS, Rabi F. 2000. Biological and chemical transformation of phosphorus in some important soil series of NWFP. Sarhad J. Agri. 16 (6) : 587-592.

Sharpley AN, Moyer B. 2000. Phosphorus forms in manure and compost and their release during simulated rainfall. J. Environ. Quai. 29 : 1462-1469.

Snyder CS, Slaton N. 2002. Effect of soil flooding and drying on phosphorus reaction. Inst. I.niews and views.4p.

Sogéta-Sogréah. 1970. Participation à la mise en valeur de l'Oued-Righ. Etude agropédologique. Ministère des travaux publics et de la construction. Service des études scientifique. Alger, 201 p."

Solis P, Torrent J. 1989. Phosphate fractions in calcareous vertisols and inceptisols of Spain. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53, 462-466.

Soltner D. 1986. Les bases de la production végétale. I. Le sol. Coll. Sciences et techniques agricoles. 256p.

Soltner D. 2005a. Les bases de production végétale. 24e Edition. Tome I, Paris, 472 p.

Soltner D., 2005b. Les grandes productions végétales. Ed. Collection sciences et techniques agricoles, Paris (20^{ème} édition), 472 p.

Song Y, Hahn H, Hoffmann E. 2001. The effect of carbonate on the precipitation of calcium phosphate. *Environmental Technology*, 23 : 207-215.

Song Y, Hahn HH, Hoffmann E. 2002. Effects of solution conditions on the precipitation of phosphate for recovery, a thermodynamic evaluation. *Chemosphere*, 48, 1029-1035.

Soon YK. 1991. Solubility and retention of phosphate in soils of the northwestern Canadian prairie. *Can. J. Soil Sci.*, 71 :453-463.

Strobel BW. 2001. Influence of vegetation on low molecular weight carboxylic acids in soil solution-a review. *Geoderma*. 99 : 169-198.

Ström L, Owen AG, Godbold DL, Jones DL. 2001. Organic acid behavior in calcareous soil: sorption and biodegradation rates. *Soil Biol Biochem.* 33 : 2125-2133.

Stumm W, Morgan JJ. 1996. Aquatic chemistry. John Wiley & Sons Ltd., New York. 1022 pages.

T

Tadano T, Ozawa K, Sakai H, Osaki M, Matsui H. 1993. Secretion of acid phosphatase by roots of crop plants under phosphorus deficient conditions and some properties of the enzyme secreted by lupin roots. *Plant and Soil* 155/156 : 95-98.

Tarafdar JC, Classen N. 2004. Adsorption behaviors of inorganic and organic sources of phosphorus in soils. *Agrochimica*, (VXLVII) 12 : 42-49.

Tesco - Viziteru. 1989. Etude du réaménagement et de l'extension des palmeraies de

l'Oued Righ. 359pp.

Thamos GW. 1975. The relationship between organic matter contents and exchangeable aluminum in acid soil. *Soil Sci. Soc. Am.* 35 : 591-596. Thesis. Dept. Soil Sci., Uni. Agri., Faisalabad, Pakistan.

Thelier-huche L, Bonischot R, Contat F, Salette J. 1996 : Incidence à long terme d'une absence prolongée de fertilisation phosphatée sur prairie permanente. *Revue Fourrages*. N° 145, pp : 53-62.

Thevenet G. 1993 : la fertilisation raisonnée. Du concept du raisonnement aux applications pratiques : la démarche du COMIFER. *Ingénieurs de la vie*. N°427/ février-mars. pp : 28-34.

Tisdale SL, Nelson WL, Beaton JD. 1985. Soil and fertilizer phosphorus, In : *Soil Fertility and Fertilizers*. Macmillan Publishing Company, New York, U.S.A. pp. 189-248.

Tsado PA, Osunde AO, Igwe CA, Eze PC, Daniya E. 2012. Influence of organic acids on phosphate sorption and availability in an alfisol of Nigerian guinea savanna. *Int J Agric Rural Dev*.15 : 1142-1146.

Turner BL, Cade-Menun BJ, Condron LM, Newman S. 2005a. Extraction of soil organic phosphorus. *Talanta* 66, 294-306.

Turner BL, Frossard E, Baldwin DS. 2005b. *Organic Phosphorus in the Environment*. CABI Publishing, 875 Massachusetts Avenue, Cambridge, USA. 399pp.

U

Unesco 1972. *Projet ERESS; Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional, et rapport sur les résultats du Projet REG-100*, UNESCO, Paris (1972).

U.S.D.A. 1967. *Keys to soil Taxonomy*. Soil conservation service. United States Department of Agriculture, 306p.

Uburger E, Jones DL, Wenzel WW. 2011. Phosphorus saturation and pH differentially regulate the efficiency of organic acid anion- mediated P solubilization mechanisms in soil. *Plant Soil*. 341, 363-382.

Udo EJ, Uzu FO. 1972. Characteristics of P adsorption by some Nigerian soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 365379484.

Uren NC, Reisenauer HM. 1998. The role of root exudates in nutrient acquisition.

V

Van Hees, PA, Jones DL, Finlay R, Godbold DL, Lundström US. 2005. The carbon we do not see - the impact of low molecular weight compounds on carbon dynamics and respiration in forest soils : A review. *Soil Biology and Biochemistry*. 37: 1-13.

Vanden Bossche H. 1999. Devenir du phosphore apporté sur les sols et risques de contamination des eaux de surface. Cas des boues de stations d'épuration. Thèse doctorat, université Rennes I, 294p.

Vatan A. 1967. Manuel de sédimentologie. Ed. Tech. Parise, 327 p.

Veith JA, Sposito G. 1977. Reactions of aluminosilicates, aluminium hydroxides, and aluminium oxide with α -phosphate : The formation of X-ray amorphous analogs of variscite and montebrasite. *Soil Science Society of America Journal*. 41 : 870-876.

W

Wandruszka Von R. 2006. Phosphorus retention in calcareous soils and the effect of organic matter on its mobility. *Geochem Tran*. 7 : 6-14.

Wang XJM, Jackman RSY, Linnquist BA. 2000. Predicting soil phosphorous buffer coefficients using potential sorption site density and soil aggregation. *Soil Sci Soc Am J*. 64 : 240-246.

Wang Y, He Y, Zhang H, Schorder J, Li C, Zhou D. 2007. Phosphate mobilization by citric, tartaric and oxalic acids in a clay loam Ultisol. *Soil Sci Soc Am J*. 72 : 1263-1268.

Webb RA. 1972. Use of boundary line technique in the analysis of biology data. *J. Hort. Sci.*, 47 : 309-19

Webber MD, Mattingly GEG. 1970. Inorganic soil phosphorus. In : Changes in monocalcium phosphate potentials on cropping. *Journal of Soil Science*. 21.111-120.

Weir CC. 1972. Phosphate studies on the Jamaica bauxite soils. *Trop. Agri*. 49 : 89- 96.

Weltzienh C. 1989. Some effects of composted organic materials on plant health. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 27 : 439-446.

White RE, Taylor AW. 1977. Reactions of soluble phosphate with acid soils: The interpretation of adsorption-desorption isotherms. *Journal of Soil Science*. 28 : 314-328.

White RE. 1981. Retention and release of phosphate by soil and soil constituents In : *Soils and Agriculture. Critical Reports on Applied Chemistry. Volume 2.* Society of Chemical Industry, Oxford, Blackwell Scientific Publications pp. 71-114.

Wild A. 1950. The retention of phosphate by soils. *J. Soil Sci.* 1 : 221 - 238.

Wild A. 1988. Plant Nutrients in Soil: Phosphate. In : *Russells Soils Conditions and Plant Growth*, (A. Wild Ed) p. 696-742. Longman Scientific Journal of Soil Research. 9 : 95-106.

Wolt JD. 1994. *Soil solution chemistry.* John Wiley and sons, New York. 450-520 pp.

Woodruff JR, Kamprath EJ. 1965. Phosphorus adsorption maximum as measured by the Langmuir isotherm and its relationship to phosphorus availability. *Soil Science Society of America Proceedings*. 29 :148-151.

Z

Zhang A, He L, Zhao H, Wu Z. 2009. Effect of organic acids on inorganic phosphorus transformation in soil with different phosphorus sources. *China J Appl Environ Biol*. 15 : 474-478.

Zhang TQ, Mackenzi AF. 1997. Changes of phosphorus fractions under continuous corn production in a temperate clay soil. *Plant Soil* 192 : 133-139.

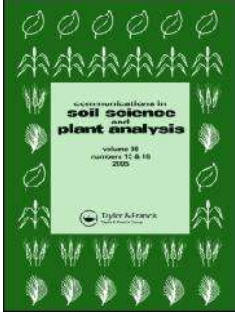
Zheng Z, Simard RR, Lafond J, Parent LE. 2002. Pathways of soil phosphorus transformation after eight years of cultivation under contrasting cropping practices *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66 : 999-1007.

Zhuo A, He L, Zhao H. 2009a. Effect of organic acids on inorganic phosphorus transformation in soils and its readily available phosphate. *Acta Ecol Sin.* 29 : 4061-4069.

Zhuo A, He L, Zhao H. 2009b. Effect of organic acids on inorganic phosphorus transformation in soil with different phosphorus sources. *China J. Appl. Environ. Biol.* 15, 474-478.

Zoltek JJR. 1974. Phosphorus removal by orthophosphate nucleation. *Journal WPCF*. 46 : 2498-2520."

Publications



Phosphorus Adsorption Isotherm: A Key Aspect for Effective Use and Environmentally Friendly Management of Phosphorus Fertilizers in Calcareous Soils

Adil Mihoub, Mustapha Daddi Bouhoun & Mohamed Lakhdar Saker

To cite this article: Adil Mihoub, Mustapha Daddi Bouhoun & Mohamed Lakhdar Saker (2016) Phosphorus Adsorption Isotherm: A Key Aspect for Effective Use and Environmentally Friendly Management of Phosphorus Fertilizers in Calcareous Soils, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47:16, 1920-1929, DOI: [10.1080/00103624.2016.1206923](https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1206923)

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/00103624.2016.1206923>

Phosphorus Adsorption Isotherm: A Key Aspect for Effective Use and Environmentally Friendly Management of Phosphorus Fertilizers in Calcareous Soils

Adil Mihoub^{a,b}, Mustapha Daddi Bouhoun^a, and Mohamed Lakhdar Saker^a

^aUniversity of Ouargla, Laboratory of Ecosystem Protection in Arid and Semi-Arid Zones, Ouargla, Algeria; ^bDivision of Soil, Scientific and Technical Research Center for Arid Areas, Biophysical Station, Nezla, Touggourt, Algeria

ABSTRACT

Crop response to the phosphorus (P) application is often erratic in most soil types in the world. In Algeria, there is no information on the P behavior in calcareous soils. The purposes of this work were to investigate the degree of P fixing capacity and to predict P fertilizer requirements of crops according to calcareous levels in the soil. Soil samples (at 0–30 cm depth) were collected and spiked with 0, 25 and 50% of lime (CaCO₃). Phosphate sorption curves were well fitted to the Freundlich equation. Results indicated that the calcareous level was predominantly controlled the P sorption indices [sorption capacity (a), and P sorption energy (n)] to affect the estimation of external P requirement (EPR_{0.2}) and P fertilizer rates. The understanding of P sorption and desorption by soils and extrapolating the developed relationship between soil calcareous contents and P fertilizer rates would be quite promising and accurate approach for the economic and effective use of P fertilizers in calcareous soils of Algeria.

KEYWORDS

Economic use of P; Freundlich model; P fertilizer requirement; P sorption characteristics; soil calcareous content

Introduction

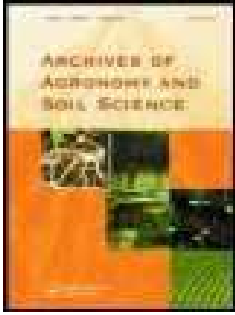
Phosphate (P) deficiency is one of the main factors limiting agricultural plant production (Kirkby and Johnston 2008; Marschner 2012; Römer 2009; Schachtmann et al. 1998). P deficiency is the most common nutritional stress in many regions of the world, affecting 42% of the cultivated land over the world (Liu, Li, and Li 1994). The cultivated lands of Algeria are mostly calcareous in nature that contains relatively high amounts of lime (CaCO₃), extremely poor organic matter and a high phosphate sorption capacity (Mihoub and Deraoui 2014).

General fertilizer recommendation may result in an excess application of fertilizer P on the soil where it may be required in less amount and insufficient quantity on some other soil where it may be needed in large amount. Phosphorus fertilizer is an expensive input and its use efficiency by crops may range from 10–25% (Rashmi et al. 2013). Owing to the high cost of P fertilizer, there is a need to apply it in the most efficient and economic ways.

Sorption isotherm technique has been suggested by many investigators to determine the amount of P required for bringing the soil solution P to a level optimum for maximum plant growth (Fox and Kamprath 1970; Holford 1997).

A number of models have been developed (Kinniburgh 1986; Mc Gechan and Lewis 2002) to quantitatively describe the sorption isotherm, the most popular being the Langmuir (Essington 2003; Pant and Reddy 2001; Dossa et al. 2008) and the Freundlich equations (Donald 2003; Essington 2003).

Phosphorus sorption relationships are commonly used in the determination of the external phosphorus requirement (EPR) of crops. EPR is the concentration of P in the solution that is non-limiting to plant growth (Fox 1981). For most crops, the amount of P in equilibrium with



Low-molecular weight organic acids improve plant availability of phosphorus in different textured calcareous soils

Adil Mihoub, Mustapha Daddi Bouhoun, Asif Naeem & Mohamed Lakhdar Saker

To cite this article: Adil Mihoub, Mustapha Daddi Bouhoun, Asif Naeem & Mohamed Lakhdar Saker (2016): Low-molecular weight organic acids improve plant availability of phosphorus in different textured calcareous soils, Archives of Agronomy and Soil Science, DOI: [10.1080/03650340.2016.1249477](https://doi.org/10.1080/03650340.2016.1249477)

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/03650340.2016.1249477>

Low-molecular weight organic acids improve plant availability of phosphorus in different textured calcareous soils

Adil Mihoub^{a,b}, Mustapha Daddi Bouhoun^a, Asif Naeem^c and Mohamed Lakhdar Saker^a

^aUniv Ouargla, Lab. Ecosystem Protection in Arid and Semi-Arid Zones, Ouargla, Algeria; ^bDivision of Soil, Biophysical Station, Scientific and Technical Research Centre for Arid Areas (CRSTRA), Touggourt, Algeria; ^cSoil and Environmental Sciences Division, Nuclear Institute for Agriculture and Biology (NIAB), Faisalabad, Pakistan

ABSTRACT

Understanding the role of organic acids on phosphorus (P) sorption capacity of soils is very important for its economic and friendly management. Combining P application with low-molecular weight organic acids could result in its higher plant availability for prolonged time. Therefore, citric and oxalic acid (at the rate of 1.0 mM kg⁻¹ soil) were evaluated for their effect on P sorption capacity and its plant availability in two different textured calcareous soils. Organic acids decreased P sorption capacity and organic carbon partition coefficient (K_{oc}) whereas increased Gibbs free energy (ΔG) of P. Organic-acid-treated soils required lesser quantity of P fertilizer to produce soil solution P concentration optimum for plant growth (external P requirement [EPR_{0.2}]), that is, 0.2 mg L⁻¹. Citric acid was efficient than oxalic acid in the above effects. P sorption parameters of Freundlich model were negatively correlated with lime potential and ΔG whereas had positive correlation ($P < 0.05$) with EPR_{0.2} and K_{oc} . Incubation with oxalic acid increased available P in loamy sand and loam soil by 20% and 30%, respectively. Thus, organic acids could help reduce application rate of P fertilizer through lowering its adsorption in highly P-fixing soils without compromise on yield.

ARTICLE HISTORY

Received 12 June 2016
Accepted 28 September 2016

KEYWORDS

Calcareous soils; economic fertilizer use; organic acids; P mobilization; P sorption isotherm

Introduction

Phosphorus (P) is a key nutrient element for the growth and development of crops. Its deficiency is one of the main constraints limiting agricultural plant production (Marschner 2012), affecting 42% of the cultivated land all over the world (Liu et al. 1994). Phosphorus needed by crops is mainly supplied through soil; however, it is easily fixed by soil minerals resulting in low fertilizer recovery, that is, 10–25% (Sun et al. 2012). One of the important factors contributing toward the high P fixation capacity of soils is their high calcium carbonate content. The United Nations Food and Agriculture Organization (FAO) estimated the extent of calcareous soils to be around 800 million hectares worldwide, mainly concentrated in areas with arid and Mediterranean climates (Land FAO & Plant Nutrition Management 2000). At least 70–90% of P that enters the soil is fixed, making it difficult for plants to absorb it (Lei et al. 2004). Therefore, recent efforts by pedologists and plant nutritionists have primarily been focused on increasing P use-efficiency of plants.

For the above reasons, farmers have to apply large amounts of P fertilizers to meet the demand of crop plants. Application of such high amounts of P fertilizers not only results in waste of existing P resources but may also lead to its build-up in soils that increases the chances of its loss causing