

## ZONES SEMI-ARIDES: REVISITER LA FERTILISATION PHOSPHATEE DES CEREALES.

Communication au 1er séminaire international  
Problématiques agronomiques en régions arides et semi-arides  
(SIAZA1)

Batna du 28-29 au 30 octobre 2013.

BELAID Djamel.

Enseignant chercheur. L.E.G JEAN ROSTAND. Laboratoires de Sciences de la Vie et de la Terre. Place Georges Paquier. BP 60329 60634 CHANTILLY CEDEX. FRANCE. djamel.belaid@ac-amiens.fr

**Résumé:** Les sols des zones semi-arides algériennes sont caractérisés par un fort pouvoir fixateur vis à vis du P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Aussi, le coefficient réel d'utilisation d'un engrais phosphaté, tel le superphosphate, diminue rapidement selon la durée de contact avec le sol. L'objectif de ce travail est d'envisager les moyens de réduire ces risques d'insolubilisation. La méthode utilisée a consisté en des essais durant trois années à Batna afin de déterminer la réponse du blé dur aux engrais phosphatés. Les résultats obtenus amènent à considérer les formes d'engrais phosphatés les plus adaptées ainsi que leurs modalités d'apport. Par ailleurs, en fonction de différents essais sont examinés des seuils d'apports de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Il apparaît que la dose d'engrais phosphatés à apporter est spécifique de chaque type de sol. La détermination des doses adéquates passe donc par l'établissement de références régionales (essais en stations, enquêtes sur des réseaux de parcelles agriculteurs). L'acide phosphorique apporté par pulvérisation foliaire s'avère être également un complément intéressant de la fertilisation au sol. Des apports de boues résiduaires contribuent à une meilleure phytodisponibilité du P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Par ailleurs, le semis direct, en permettant une plus longue conservation de l'humidité du sol assure une meilleure assimilation du phosphore du sol malgré une moindre répartition du P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> en profondeur.

**Mots clés:** phosphore, phytodisponibilité, doses, boues, non-labour.

### INTRODUCTION.

Le phosphore (P) est primordial pour la croissance des plantes même s'il ne représente que 0,2% de leur matière sèche. Cet élément est l'un des plus difficile à acquérir pour les plantes. Il est souvent le facteur minéral limitant des cultures; des pertes de 5 à 15% ne sont pas rares voire beaucoup plus en sols calcaires (HINSINGER, 2001). Aussi, appréhender comment les plantes maintiennent leur homéostasie en P et contournent les carences du sol est un défi pour l'agriculture en milieu semi-aride.

Les plantes absorbent le P sous forme d'ions phosphate inorganique en solution dans le sol. De ce fait, l'absorption du P est tributaire d'un niveau minimum d'humidité du sol. La majorité des racines des espèces cultivées sont associées à des champignons (mycorhizes) qui permettent une meilleure absorption des éléments minéraux du sol.

Comparant des rendements parcellaires et les flux moyen de transfert entre la phase solide et la phase liquide FARDEAU et al., (1991) ont montré «que le seul facteur susceptible de limiter la nutrition phosphatée est bien le flux». Ce qui amène ces auteurs «à privilégier la présence d'eau dans le sol comme facteur prioritaire pour assurer une nutrition phosphatée satisfaisante même lorsque les stricts besoins en eau sont satisfaits». Peu d'études existent concernant la richesse en P du

sol des zones semi-arides algériennes. BENHASSINE et al., 2008 observant la faible valeur du coefficient de corrélation entre P du sol et matière organique, concluent que le P organique est peu importants dans les sols semi-arides tunisiens.

Nous examinerons comment, face à de telles contraintes, les cultures des systèmes céréales-légumineuses ont développé des stratégies afin de maintenir leur homéostasie en P et pour en maximiser son acquisition.

### I-LA RETROGRADATION DU PHOSPHORE EN SOL CALCAIRE.

Les apports de P constituent un facteur primordial d'amélioration du rendement des céréales d'hiver. Sur blé dur, ces améliorations se font principalement par l'augmentation: de la fertilité des épis BELAID (1987), ATI (2010) et du poids du grain BELAID (1987), AISSA et MHIRI (2002).

Le fort pouvoir fixateur des sols calcaires locaux entraîne une rapide rétrogradation des apports d'engrais phosphatés. Selon FARDEAU (2005), le coefficient réel d'utilisation (CRU) de l'engrais phosphaté superphosphate 1 à 2 mois après épandage est de 15 à 20% et de moins de 2% après un an dans un sol limoneux. Si ce type d'engrais est apporté en août, après la récolte des céréales à pailles, pour un maïs semé au printemps suivant, le coefficient réel d'utilisation est de 5% sur sol limoneux et en dessous de cette valeur si le sol est calcaire (Tab 1). Dans le cas d'un apport de tri-super phosphate (TSP) sur labour de jachère, on peut s'attendre à de très faibles CRU dans les sols calcaires des zones semi-arides.

Mois	Sol de limon (pH 6,5)	Sol argilo-calcaire (pH 8)
0	20	12
2	15	4
4	8	2
8	5	0,5
12	2	0,1

Tableau 1. Evolution du coefficient d'utilisation réel d'un engrais phosphaté de type TSP selon le type de sol (FARDEAU 2005).

Trop souvent les préconisations ont été d'épandre les engrais phosphatés lors des labours de jachère comme «fumure de fonds», c'est à dire loin du moment d'absorption du P par la plante. Actuellement, il est préconisé «d'apporter une partie de la fumure phosphaté, sous forme soluble, au dernier moment (juste avant le semis), localisée sur les lignes de semis, quand c'est possible» (ITGC 2010).

### II-OPTIMISATION DES APPORTS FERTILISANTS.

L'optimisation de la fertilisation phosphatée en milieu semi-aride nécessite de prendre en considération les contraintes liées aux risques de rétrogradation du P. Différentes stratégies sont possibles.

#### A-Teneurs de P, dates d'apports des engrais.

Les relations établies entre rendement et teneur du sol en P assimilable sont propres à chaque type de sol. De ce fait, les teneurs au delà desquels les apports sont nécessaires varient d'un type de sol à l'autre (Tab 2).

Type de sol	Teneur du sol en P (Olsen)
-------------	----------------------------

	mg/kg) pour obtenir l'optimum de rendement.
Limon-argileux	8
Argilo-calcaire	13
Sableux	24

Tableau 2: Courbe de réponse du blé par rapport à la teneur du sol en P (MOREL, 1992).

L'obtention de tels seuils passe par la réalisation d'essais en stations mais aussi par des enquêtes culture associant la collecte des rendements obtenus et la teneur en P du sol (BELAID, 1993).

Différents travaux montrent tout l'intérêt d'apporter le P assez tôt par rapport à la période intense d'absorption du blé. AISSA (1992) a montré que les engrais phosphatés peuvent avoir un effet positif sur le rendement quand ils sont apportés au semis et localisés avec la semence. Un essai d'Arvalis (ex-ITCF) dans le Sud Ouest (France), sur un sol très pauvre en P (P2O5 Olsen = 10.6 mg /kg), montre qu'un apport de 30 kg de P2O5 /ha avant le semis permet un gain de 10 % de rendement par rapport au même apport réalisé au stade épis 1 cm (Tab 3).

Doses (kg P2O5/ha/an)/ Régime de fertilisation	P avant semis	P stade 2 talles	P stade épi 1 cm
P0	75		
P30	102	94	88
P60	96	95	98

Tableau 3: Effet de la date d'apport de P sur le rendement du blé Isengrain dans un sol pauvre en P à Montans (France) réalisé par Arvalis en 1998.

Dans les conditions semi-arides en Tunisie, AISSA et MHIRI (2002) notent que « le prélèvement de P par la culture de blé exprimé en pourcentage de la matière sèche a montré la même tendance pour les différents sites avec une concentration plus élevée au stade précoce (tallage) et une diminution progressive jusqu'au stade maturité ».

### B-Concernant les modes d'apport.

Les modes d'apport du P sont variés: localisation de l'engrais, combinaison de l'engrais avec d'autres fertilisants ou pulvérisation foliaire d'un engrais liquide. Il est intéressant d'étudier l'effet de ces modes d'apports par rapport aux contraintes spécifiques du milieu semi-aride.

#### 1)localisation de l'apport

Un apport localisé de P permet une prolifération des racines HINSINGER (2001). Effet qu'on n'observe pas dans les cas d'apports localisés de potassium ou d'ammonium. Un tel développement du système racinaire des céréales est un gage d'approvisionnement minéral. C'est chez les jeunes plants que la demande en P est la plus forte. Aussi, c'est très tôt que les carences en P peuvent s'installer et pénaliser le rendement final. Selon HALITIM (1996), afin de lutter contre les risques d'insolubilisation, un engrais phosphaté de type superphosphate doit être apporté au plus près des besoins des plantes d'autant plus que le sol est riche en calcaire.

#### 2)L'effet de la formulation de l'engrais phosphaté.

Le Di-Ammonium de Phosphate (DAP) présente une forme d'azote qui permet une action acidifiante sur le sol (pH de

l'engrais de 4,5). Des essais comparatifs menés sur blé (ITGC 2007) montrent un avantage pour le DAP, 56 qx/ha pour 100 kg/ha de MAP contre 38 qx/ha avec 100 kg de SP 45. Ces résultats sont à relier avec l'effet acidifiant du DAP qui permet une meilleure bio-disponibilité du phosphore du sol.

Les effets acidifiants d'engrais sont observés sur un essai de l'ITGC réalisés en 2007 au Khroubs. Cet essai vise à connaître l'effet de la combinaison du MAP, du sulfate d'ammonium et du sulfate de potassium et aboutit à recommander la combinaison de MAP de sulfate d'ammonium et de sulfate de potassium. Si le rendement obtenu s'explique par la satisfaction des besoins de la plante en éléments NPK, il serait intéressant de préciser dans de tels essais, l'effet acidifiant de l'azote apporté sous forme ammoniacal ainsi que l'effet du sulfate présent à travers le sulfate d'ammonium ou du sulfate de potassium.

Un effet semblable à celui du DAP a été observé avec le superphosphate 46% utilisé simultanément avec du sulfazote juste avant semis dans un essai à Sétif (ITGC, 2010). Les auteurs notent « que le sulfazote a amélioré significativement l'assimilation du P dans les conditions du sol marqué par une teneur en calcaire élevée ».

Ces résultats sont à relier avec l'effet acidifiant du MAP (MIHOUB 2012) qui permet une meilleure bio-disponibilité du phosphore du sol (tab 4).

	15 jours	30 jours	45 jours
Témoin	64 (8,6)	75 (8,55)	84 (8,44)
MAP	122 (7,84)	145 (7,91)	121 (7,81)
SSP	104 (8,12)	107 (8,14)	102 (8,13)

Tableau 4: Evolution du taux de P (Olsen) et du pH du sol suite à l'apport de divers types d'engrais phosphatés (MIHOUB 2012).

La diminution de pH de la rhizosphère induit par l'apport d'azote sous forme d'ions  $NH_4^+$  exerce une forte influence sur la biodisponibilité du P du sol. RILEY et BARBER (1971) ont trouvé que la concentration de P dans les parties aériennes du soja augmente linéairement avec la baisse du pH (%P plantes =  $0.368 - 0.034 \text{ pH}$ ,  $r^2 = 0.94$ ). L'application combinée de P avec de l'azote ammoniacal augmente significativement la croissance des racines du maïs et l'utilisation du P à un stade précoce par stimulation de la prolifération des racines et l'acidification de la rhizosphère (JING et al., 2010). GAHOONIA et al. (1992) ont également rapporté que le ray-grass fertilisé avec  $NH_4^+$  prélève plus de P d'un sol acide (luvisol) que lorsqu'il reçoit  $NO_3^-$ .

Lorsque la racine absorbe un ion ammonium ( $NH_4^+$ ), elle rejette un ion hydrogène ( $H^+$ ); le pH baisse. Quand elle absorbe un ion nitrate ( $NO_3^-$ ), elle absorbe un ion hydroxyle ( $OH^-$ ); le pH augmente. L'effet acidifiant du soufre apporté par les engrais vient du fait que les micro-organismes du sol le métabolisent et forment de l'acide sulfurique. Certaines racines peuvent induire une acidification de la rhizosphère qui peut être de 2 à 3 unité de pH par rapport au reste du sol ce qui permet de dissoudre le phosphore modérément assimilable du sol (MARSCHNER, 1995).

#### 3)Les apports foliaires

L'orge réagit particulièrement bien à un apport de P et d'oligoéléments par voie foliaire (MECKLICHE et al., 2011). Cette pulvérisation a permis un gain de 13 quintaux/ha de grains (Tab 5).

Traitements	Rendement en grains	Rendement en paille
-------------	---------------------	---------------------

	(qx/ha).	(qx/ha)
T1 : Témoin sans fertilisation foliaire	26,4	40
T2 : Fertilisation foliaire (Agriphos : phosphore et oligo-éléments)	39,4	48,2

Tableau 5: Résultats (extraits) d'un essai d'optimisation de fertilisation foliaire mené en zone semi-aride sur orge (MECKLICHE et al.2011).

AISSA et MHIRI (2002) observent en conditions semi-arides de la Tunisie, un effet significatif de 2 pulvérisations foliaires d'une solution de sulfate de potassium sur blé dur. Ils notent par ailleurs une interaction entre ces apports et les apports d'azote et de P « la mise à disposition de la plante du potassium aisément métabolisable par un apport foliaire entraîne une meilleure assimilation de l'azote et du P disponibles dans le sol »

La fertilisation foliaire peut permettre une amélioration des rendements. Elle vient en complément d'une fertilisation au sol et ne peut en aucun cas se substituer à elle. Elle ne vient que corriger une difficulté ponctuelle d'absorption racinaire. Les quantités de P apportées par les apports foliaires sont en général très faibles, de l'ordre de 1 à 2 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ ha (VALE 2011), voire 8 kg dans le cas du sulfate de potassium (AISSA et MHIRI 2002).

L'efficacité d'une pulvérisation foliaire dépend des conditions d'application (hygrométrie de l'air) et de la formulation du fertilisant. La forme acide phosphorique ressort comme la plus assimilable (VALE 2011). L'effet des pulvérisations de P pourrait être expliqué par des transferts de cet élément dans les différentes parties de la plante. « Les besoins de P des parties jeunes de la plante sont couverts par des mécanismes d'appel qui mobilisent le P à partir des parties plus âgées de la plante »VALE (2011).

#### C-Concernant les amendements organiques.

En conditions semi-arides, un apport de boues résiduaires sur culture de blé dur permet le passage de 14 qx/ha à 34 qx/ha pour un apport de 40 tonnes/ha (ATI (2010)). Ces résultats sont expliqués par le fait que «le P assimilable a été valorisé par la végétation, et ceci revient à la matière organique contenue dans la boue qui forme un complexe phospho-humique et dont la minéralisation progressive permet d'assurer une disponibilité de cet élément pour la plante». Les acides humiques issus de ces amendements produisent un grand nombre de charges négatives (groupes carboxyl et hydroxyl) qui entrent en compétition vis à vis de l'adsorption du P au niveau du sol.

Le contenu en matières organiques de ces boues « voire son pH, accroît la biodisponibilité de l'élément préexistant dans le sol en influant sur l'aptitude des particules de sols à libérer les éléments » (THIEN et MYERS, 1992).

La biodisponibilité du P présent dans les boues résiduaires de station d'épuration est fonction du type de traitement industriel des eaux FARDEAU (2000). Le P est sous forme ionique, ou bien inclus dans les bactéries responsables de l'épuration. Il est assimilable comme tout résidu constitué d'organismes vivants. Seuls des traitements industriels, » tel un chaulage à pH 11.5, l'addition de sels de fer et/ou d'aluminium, et/ou un chauffage assurant une stérilisation, s'ajoute à l'épuration biologique, la concentration des ions phosphate dans les solutions des boues diminue, malgré une augmentation de la teneur du P total : P devient de moins en moins assimilable pour les plantes

(FARDEAU 2000).

Selon ATI (2010), l'apport de boues résiduaires se traduit par une meilleure alimentation hydrique: « on a remarqué, cependant, au cours de l'expérience que la végétation du témoin était relativement moins tardive (feuillage se desséchant plus vite) ce qui laisse supposer que l'amendement avec des boues résiduaires permet de garder plus longtemps l'eau du sol grâce à la matière organique qu'elles contiennent et qui agit comme un capteur tampon de l'humidité. L'apport de boues se traduit par une augmentation des teneurs en P de la plante (Tab 6).

	Témoin	20 Tonnes/ha	40 Tonnes/ha
Teneur en phosphore de la plante et rendement	0,24% (14 qx/ha)	0,34%	0,38% (34 qx/ha)

Tableau 6: Effet d'apports croissants de boues résiduaires sur la teneur en P du blé dur (ATI 2010).

D'autres essais de plein champ pourraient permettre de déterminer la valeur fertilisante phosphatée à long terme. Il s'agirait d'observer l'évolution différenciée de la disponibilité du P dans les sols recevant différents types d'apports et de comparer les variations de la solubilité et de la mobilité des ions phosphatés en fonction des différentes formes et doses d'apport. En s'inspirant des travaux sur les phospho-composts à base de phosphates naturels (HELLAL et al., 2012), on peut se demander quel pourrait être l'effet de composts enrichis en super-phosphate. En effet, la production d'acides organiques tels l'acide citrique, oxalique, tartrique durant le compostage de la matière organique peuvent entraîner la dissolution du P de phosphates naturels (CHIEN, MENON 1995).

### III-ESPECES, VARIETES ET PRATIQUES CULTURALES.

#### A-Concernant les espèces et les variétés.

Différentes espèces de lupins dont *Lupinus pilosus* présentent la capacité à acidifier leur rhizosphère (PEARSE et al., 2006). Cette faculté à acidifier leur rhizosphère serait liée à la capacité de certaines plantes à mieux utiliser le P du sol. Certaines espèces telles le pois-chiche, le lupin blanc et la féverole présentent une forte capacité à utiliser le P du sol (BOLLAND et GILKS 1990).

Analysant le système racinaire de 30 variétés d'orge GAHOONIA et NIELSEN (1997) notent l'abondance des poils absorbants de la variété Salka et sa faculté à prélever plus de P du sol (Tab 7).

	L.racine (mm) en solution	L.racine dans le sol	Surface racine dans le sol	MS racine en solution (mg)	MS feuilles en solution (g)	Phosphore dans MS
Salka	32±4	1.10 ±0.16	206,00 %	163±9	1.65±0.22	0.42±0.1%
Zita	21±3	0.63±0.18	81,00 %	153±1	1.51±0.31	0.41±0.08 %

Tableau 7: Longueur des poils absorbants de 2 variétés d'orge et leur capacité à absorber le P du sol (GAHOONIA, NIELSEN 1997).

La capacité de Salka à absorber plus de P du sol serait liée à la longueur de ses racines et à la densité de son système racinaire. Chez le riz l'insertion du gène PSTOL1 dans de nouvelles variétés « améliore considérablement le rendement en grains dans des sol pauvres en P. D'autres analyses montrent que PSTOL1 agit comme un activateur de la croissance racinaire précoce, permettant ainsi aux plantes d'acquérir plus de P » (GAMUYAO et al., 2012). Par ailleurs, l'action des mycorhizes en grandes cultures mérite de ne pas être sous estimée. « Les champignons MA permettent d'augmenter le volume de sol exploré et de dépasser cette zone d'appauvrissement grâce à leur mycélium extra-racinaire composé d'hyphes très fins et bien plus longs que les poils absorbants, environ 100 fois plus » (JAVOT et al., 2007).

#### B-Rotations et cultures associées.

Les pratiques culturales peuvent influencer la bio-disponibilité du P. Ces pratiques influent sur les êtres vivants du sol microscopiques ou macroscopiques. Il a été observé que les déjections de vers de terre présentent 3 fois plus de P extractible dans l'eau. Certaines espèces de lombrics favorisent même la dissolution du phosphate naturel et donc la disponibilité de dérivés du P dans le sol. Mais, c'est au niveau même de la rhizosphère qu'intervient les processus biologiques les plus intéressants.

#### 1) Cultures à fort pouvoir d'extraction du phosphore et cultures associées.

Deux cas sont à considérer, les rotations culturales et les cultures associées. Les rotations céréales et cultures à fort pouvoir d'extraction du P ont toujours existé localement; c'est le cas de la jachère pâturée comportant des espèces spontanées de medicago. Les légumineuses à graines montrent un meilleur prélèvement du P du sol que le blé, faisant d'elles un élément intéressant dans les systèmes de cultures visant la mobilisation du P du sol (BOLLAND et al., 1999).

La croissance et les prélèvements de P d'un maïs en rotation avec des légumineuses sont améliorés du fait de la meilleure mobilisation du P du sol par ces légumineuses (KAMH et al., 1999). Une rotation légumineuse-céréale montre une amélioration de la nutrition phosphatée des céréales (HORST et al., 1999).

Le fourrage de vesce-avoine est une culture associée couramment pratiquée en Algérie. L'association de la légumineuse permet d'améliorer les prélèvements de P du sol (MUZANGWAA et al., 2012). L'association d'une légumineuse au blé est souvent utilisée afin d'améliorer la production des grains et leur taux en protéines (BEDOUSSAC et JUSTES 2010). Cependant, différents travaux montrent une meilleure assimilation du P du sol en cas d'association de céréales et de légumineuses. Associé au pois chiche, le blé montre une meilleure croissance ainsi qu'une meilleure nutrition en P qui provient de la capacité du pois-chiche à mobiliser le P organique du sol (LI et al., 2003) grâce notamment à la production de phosphatase acide (LI et al., 2004).

La culture associée de blé et de lupin blanc améliore la croissance et la nutrition phosphatée de la céréale GARDNER et BOUNDY (1983), SUONG et al., (2005). Associé à la féverole le maïs produit jusqu'à 129 quintaux par hectare (LI et al., 2007). Si on remplace la féverole par du blé, le rendement de maïs n'est plus que de 92 quintaux. L'engrais phosphaté

devient inutile, voire même exerce un effet dépressif à la dose de 112 kg, le rendement baissant à 109 quintaux. La meilleure utilisation du P du sol par les cultures associées est observée en cas de faibles niveaux de fertilisation P, cet effet décroît en cas de niveaux plus élevés en P (LI et al., 2007).

Les processus tendant à améliorer les prélèvements de P par les plantes sont multiples: production accrue et sécrétion de phosphatases, exudation d'acides organiques, meilleur développement des racines, modification de leur architecture, augmentation de la surface racinaire par développement des poils absorbants, surexpression de transporteurs membranaires de P ou stimulation de bactéries et de champignons (HISINGER, 2001). Ces processus ont en général une durée limitée. Acides organiques et enzymes par exemple, peuvent être assez rapidement dégradés. C'est ce qui explique que le gain de rendement obtenu par l'association de deux cultures puisse être supérieur à celui par leur culture l'une après l'autre.

#### 2) Phosphore et non labour.

Le non-labour associée aux techniques culturales simplifiées ou au semis direct, permet une amélioration des rendements (Tab 8) notamment grâce à une meilleure efficacité de l'eau de pluie emmagasinée dans le sol (MRABET 1997).

	Régime humide	Régime sec
Non labour	39	25
chisel	31	10
charrue	15	0

Tableau 8: Durée en jours nécessaire pour atteindre le point de flétrissement à l'horizon (0-10 cm) en fonction du type de travail du sol pour deux régimes hydriques; humide: apport d'eau 77 mm et sec: apport d'eau 35 mm. (MRABET 1997).

Cette préservation de l'humidité du sol ne peut qu'améliorer la nutrition phosphatée des cultures. La pratique de non labour est cependant à l'origine d'une moindre répartition des engrais phosphatés en profondeur (ZIBILSKE et BRADFORD 2003).

#### **CONCLUSION:**

En zone semi-aride, la fertilisation phosphatée des céréales est confrontée à une contrainte majeure: le fort pouvoir fixateur des sols. La faible humidité du sol ainsi que son faible taux en matières organique aggravent cette situation. Afin d'optimiser l'emploi des engrais phosphatés et permettre de maintenir l'homéostasie du P dans la plante, il s'agit de maximiser l'acquisition de cet élément. Les connaissances actuelles pour améliorer la nutrition dans les systèmes de cultures céréales-légumineuse sont prometteuses. Des espèces adaptées aux milieux semi-arides telles lupin, féverole ou pois chiche présentent des mécanismes originaux de prélèvement du P du sol. Ainsi, différentes stratégies existent. Certaines sont relativement faciles à mettre en œuvre.

- La dose à apporter au blé dur est spécifique de chaque type de sol. La détermination de ces doses passe donc par l'établissement de références régionales selon le type de sols. Aux essais en station, des enquêtes rendement et teneur en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> des parcelles peuvent permettre d'établir des seuils de fertilisation.
- Les dernières avancées en matière de comportement du P dans les sols à fort pouvoir fixateur montrent la nécessité d'apporter cet élément au plus près des besoins de la plante. En effet, les travaux de Fardeau (2005) ont montré que le CRU d'un engrais phosphaté, type superphosphate, diminue significativement

lorsque le temps de contact avec le sol augmente.

- Les amendements organiques et notamment les boues résiduaires (exemptes d'éléments trace-métalliques) s'avèrent intéressantes. Non seulement, elles apportent du P mais en plus, contribuent à une meilleure phytodisponibilité du P du sol.
- La plus grande disponibilité locale de différentes formes d'engrais phosphatés, dont certains dit à « pouvoir acidifiant » permet le recours à une fertilisation mieux adaptée aux sols à forts pouvoir fixateur. La mise à la disposition des exploitations de ce type d'engrais constitue une avancée majeure.

A moyen terme, il s'agit d'utiliser les mécanismes morphologiques et physiologiques d'acquisition du P du sol existant chez certaines espèces, notamment les légumineuses. Celles-ci, connues jusqu'à présent pour leur faculté d'utiliser l'azote de l'air, montrent également une bonne aptitude à mobiliser le P du sol. Différents axes de recherche sont possibles.

- Utilisation de cultures associées: de plus en plus d'études montrent l'existence d'interactions positives céréales-légumineuses en ce qui concerne l'acquisition du P du sol. Les cultures associées présentent un intérêt d'autant plus grand que les ressources du milieu sont limitées comme c'est le cas dans les agro-systèmes à bas niveau d'intrants.

- Diversité des stratégies d'acquisition du P. Les mécanismes utilisés par les espèces cultivées sont d'une grande diversité: acidification du sol, sécrétion d'enzymes, stimulation de bactéries et de champignons, architecture racinaire. Il s'agit de les identifier selon les espèces et parmi les différents génotypes locaux.

Les techniques de non labour et notamment le semis direct sont particulièrement intéressantes afin de conserver l'humidité du sol. Cette humidité peut améliorer la phytodisponibilité du P. Cependant, ce type de techniques provoque une moindre répartition en profondeur du P qui pourrait être défavorable aux prélèvements de cet élément par la plante.

La nutrition phosphatée des céréales en zones semi-aride a été longtemps cantonnée aux seuls apports de super-phosphate. Dorénavant, elle doit tenir compte de la réaction des espèces et de leurs génotypes aux apports d'engrais combinés, aux mécanismes de facilitation entre espèces (cultures associées) et aux mécanismes intrinsèques de la rhizosphère (dont la mycorrhization).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

ATI S., 2010 Etude de l'effet des boues résiduaires sur sol cultivé: dynamique du phosphore et son utilisation en zone semi-aride. Mémoire de magister. Université Batna. Département d'Agronomie. 62 p.

AISSA A.D., MHIRI A., 2002 Fertilisation phospho-potassique du blé dur en culture intensive en Tunisie Cahiers Agricultures. Vol 11 (6), 391-7, Notes de recherche.

AISSA A.D., 1992 Effet de la forme de l'engrais phosphaté et de sa méthode d'application sur le rendement en grain du blé dur. Revue INAT., 2 : 145-52.

BATES TR, LYNCH JP. 2000 *The efficiency of Arabidopsis thaliana (Brassicaceae) root hairs in phosphorus acquisition.* In American J. of Botany. 87: 964-970.

BEDOUSSAC L, JUSTES E. 2010 The efficiency of a durum wheat-winter pea intercrop to improve yield and wheat grain protein concentration depends on N availability during early growth. Plant Soil 330: 19-35.

BELAID D., 1987 : Etude de la fertilisation azotée et phosphatée d'une variété de blé dur (Hedba3) en conditions de déficit hydrique. Mémoire de magistère. I.N.A 108p.

BELAID D., 1993 Enquête culture betteraves à sucre. Chambre d'Agriculture de l'Oise. ODASE 4p.

BEN HASSINE H., ALOUI T., GALLALI T., BOUZID T., EL AMRI S., BEN HASSEN R., 2008 Evaluation quantitative et rôles de la matière organique dans les sols cultivés en zones sub-humides et semi-arides méditerranéennes de la Tunisie. *In Agrosolutions. Vol. 19 (2), 1-17.*

BOLLAND MDA, GILKES, RJ 1990 Rock phosphates are not effective fertilizers in Western Australian soils: a review of one hundred years of research. Ferti. Res., 22 : 79-95.

CHIEN S.H., MENON R.G., 1995 Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. Fert. Res., 41: 227-234.

FARDEAU JC., MOREL C., BONIFACE R., 1991 Cinétiques de transfert des ions phosphate du sol vers la solution du sol : paramètres caractéristiques. Agronomie 11, 787-797

FARDEAU JC., 2000 Estimation de la biodisponibilité des éléments nutritifs contenus dans les produits résiduaires organiques. Ingénieries 21, 15-28.

FARDEAU JC., 2005. Dynamique du phosphore et du potassium dans le système sol-plante. Dans «Fertilisation P-K : raisonner pour agir », ARVALIS Institut du Végétal, p. 12-19

GAHOONIA T.S., NIELSEN N.E., 1997 Variation in root hairs of barley cultivars doubled soil phosphorus uptake. Euphytica 12-1997, Vol 98 (3), pp 177-182

GAHOONIA T.S., Claassen N., Jungk A., 1992 Mobilization of phosphate in different soils by ryegrass supplied with ammonium or nitrate. Plant Soil 140, 241-248

GARDNER WK., BOUNDY KA., 1983 The acquisition of phosphorus by *Lupinus albus* L. IV. The effect of interplanting wheat and white lupin on the growth and mineral composition of the two species. Plant Soil 70: 391-402

GAMUYAO R., HYOUN CHIN J., PARIASCA-TANAKA J., PESARESI P., CATAUSAN S., DALID C., SLAMET-LOEDIN I., TECSON-MENDOZA EM., MATTHIAS WISSUWA., HEUER S., 2012 The protein kinase Pst11 from traditional rice confers tolerance of phosphorus deficiency. Nature 488, 535-539

HALITIM A. 1986 Communication personnelle.

HELLAL, F.A., NAGUMO, F. ZEWAINY, R.M. 2012 Influence of Phospho-Composting on Enhancing Phosphorus Solubility from Inactive Rock Phosphate Australian J. of Basic and Applied Sci., 6(5): 268-276.

HORST WJ, KAMH M, JIBRIN JM, CHUDE VO 2001 Agronomic measures for increasing P availability to crops. Plant Soil. 237: 211-223.

HINSINGER P 2001 Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. Plant Soil 237:173-195

HODGES T, KANEMASU E T 1977. Modeling daily dry matter production of winter wheat. Agronomy J. 69 : 974-978.

ITGC 2007 La fertilisation phosphatée. Site internet de l'ITGC.

ITGC 2010 Essais de fertilisation combinée azotée et phosphatée. Site internet de l'ITGC.

JAVOT H, PUMPLIN N, HARRISON MJ. 2007 Phosphate in the arbuscular mycorrhizal symbiosis: transport properties and regulatory roles. Plant Cell Environ. 30(3):310-22.

JING J, RUI Y, ZHANG F, RENGEL Z, SHEN J. 2010 Localized application of phosphorus and ammonium improves growth of maize seedlings by stimulating root proliferation and rhizosphere acidification. Field Crops Research. 119, 355-364.

LI L, TANG C, RENGEL Z, ZHANG F. 2003 Chickpea facilitates phosphorus uptake by intercropped wheat from an organic phosphorus source. Plant Soil 248: 297-303.

Li L, Li SM, Sun JH, Zhou LL, Bao XG, Zhang HG, Zhang FS. (2007) Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils. Proc Natl Acad Sci USA 104: 11192-11196

LI SM, LI L, Zhang FS, Tang C., 2004 Acid phosphatase role in chickpea/maize intercropping. Ann Bot (Lond) 94: 297-303.

KAMH M., HORST WJ., AMER F., MOSTAFA H., MAIER P., (1999) Mobilization of soil and fertilizer phosphate by cover crops.

Plant and Soil 211, 19-27.

MARSCHNER H., 1995 *Mineral Nutrition of Higher Plants, Ed 2. Academic Press, London, p 889*

MEKLCHE A., DAHMANI S., HABBES S., HANIFI-MEKLCHE L. 2001 Optimisation de la production d'orge en semis direct dans la région de Meskiana (Oum El Bouaghi). Options Méditerranéennes : Série A. 96: 147-151

MIHOUB A., 2012 Dynamique du phosphore dans le système sol plante en conditions pédo-climatiques sahariennes. Mémoire de Magister. Université de Ouargla. 101p.

MOREL C., PLENCHETTE C., FARDEAU J.C., 1992. La fertilisation phosphatée raisonnée de la culture de blé. Agronomie 12 :565-579.

MRABET R., 1997 *Crop residue management and tillage systems for water conservation in a semi-arid area of Morocco*. Ph D. Diss. Colorado State University, Fort Collins, CO. USA. 209 p.

MAHIMAIRAJA S., BOLAN N.S., HEDLEY M.J., 1994 Dissolution of phosphate rock during the composting of poultry manure: an incubation experiment. Fert. Res., Vol 40 (2): 93-104.

MUZANGWAA L., CHIDUZAB C., MUCHAONYERWAC P., 2012 Biomass production, weed suppression, nitrogen and phosphorus uptake in white oat (*Avena sativa* L.) and grazing vetch (*Vicia dasycarpa* L.) cover crop bicultures under an irrigated no-till system. South African J. of Plant and Soil. Vol 29: 3-4, 135-141.

PEARSE SJ., VENEKLAAS EJ., CAWTHRAY GR., BOLLAND MDA, LAMBERS H., 2006. Carboxylate release of wheat, canola and 11 grain legume species as affected by phosphorus status. Plant and Soil 288: 127-139.

RILEY D and BARBER S A 1971 Effect of ammonium and nitrate fertilization on phosphorus uptake as related to root-induced pH changes at the root-soil interface. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 35,301-306

STUART J. PEARSE E J. Veneklaas Æ Greg R. Cawthray Æ Mike Bolland D.A., Lambers H2006 Carboxylate release of wheat, canola and 11 grain legume species as affected by phosphorus status. Plant Soil. 288:127-139

SUONG TT., HUTSON CJ., SCHULLER KA., 2005 Mixed culture of wheat (*Triticum aestivum* L.) with white lupin (*Lupinus albus* L.) improves the growth and phosphorus nutrition of the wheat . Plant and Soil. 272:143-151.

THIEN SJ., MYERS R., 1992. Determination of bioavailable phosphorus in soil. Soil Sci. Soc. Am. J., 56 :p. 814-818

VALE M., 2011 Perspectives d'évolution pour le raisonnement de la fertilisation phosphatée Responsable Recherche et Développement Agronomiques du groupe SAS Laboratoire –AGRO-Systèmes, [mvale@saslaboratoire.com](mailto:mvale@saslaboratoire.com)

ZIBILSKE LM., BRADFORD JM., 2003 Tillage effects on phosphorus mineralization and microbial activity. Soil Sci. 168, 677-685.