

Étude de l'évolution des réserves phosphatées totales et assimilables dans les sols céréaliers du Nord-Ouest tunisien

H. Ben Hassine¹

Résumé, *H. Ben Hassine¹. **Étude de l'évolution des réserves phosphatées totales et assimilables dans les sols céréaliers du Nord-Ouest tunisien. *Agrosol*. 15 (2) : 73-82.** Le phosphore est un élément fortement utilisé par les cultures céréalières sous régime pluvial dans les sols à texture fine et carbonatée et non-carbonatée du Nord-Ouest tunisien. Le suivi de l'évolution des réserves totales a montré que les quantités bloquées sous forme insoluble sont importantes, notamment dans les sols constamment fertilisés. Les fractions assimilables sont proportionnelles aux réserves totales et leurs teneurs sont plus importantes dans les sols fertilisés du milieu subhumide. Ces fractions ont tendance à diminuer en fin de campagne, ce qui justifie le recours à la fertilisation minérale. Les quantités apportées actuellement sont à revoir puisqu'elles dépassent largement les besoins des cultures évalués sur leurs exportations annuelles en cet élément. Les excès rejoignent inéluctablement les formes insolubles, ce qui constitue un risque supplémentaire pour l'eutrophisation des eaux de surface d'une part, et l'augmentation inutile des charges de production d'autre part.

Mots clés : Phosphore assimilable, carbonates, réserves, exportations, bilan, conditions climatiques, céréales.

Abstract, *H. Ben Hassine¹. **Evolution of total and available phosphate reserves under cereal production soils in Northwestern Tunisia. *Agrosol*. 15 (2): 73-82.** Phosphorus is largely used by cereals grown under rainfed regime of fine textured and carbonated soils of Northwestern Tunisia. Monitoring of the evolution of the total reserves showed that the quantities immobilized under insoluble forms are notably important in annually fertilized soils. The available fraction of P is proportional to the total reserve and its content is more important in fertilized soils of the subhumid environment. This fraction tends to decrease at the end of the growing season, which justifies the mineral fertilization. The applied quantities of P should be re-examined since they exceed the requirements of the crops on the basis of their yearly exports. These P surplusses are transformed into insoluble forms, which constitute a supplementary risk for eutrophication of surface waters and also an increase in cost production for these crops.

Key words: Available phosphorus, carbonates, reserves, export, balance, weather conditions, cereals.

Introduction

Les aliments céréaliers constituent des besoins essentiels pour la population tunisienne qui en consomme plus de 20 millions de quintaux au cours de chaque année (ministère du Développement économique, 1995). Des surfaces importantes, de l'ordre de 1,5 million d'hectares, sont affectées aux cultures céréalières qui sont menées pour la plupart sous conditions pluviales. Elles sont ainsi tributaires des hauteurs pluviométriques annuelles et des techniques culturales (Ben Hassine, 2002). Pour améliorer les rendements de ces cultures, des « recettes » de fertilisa-

tion phosphatée et azotée sont appliquées au cours de chaque campagne agricole sur des sols qui ne diffèrent pas trop par leur typologie et leurs constituants, mais essentiellement par leur situation dans le paysage et leur dépendance bioclimatique. Ces sols sont en effet situés au nord de la dorsale tunisienne et occupent, soit les plaines alluviales et inter-montagneuses, soit des reliefs résiduels en forme de croupe issus de l'altération et des remaniements de matériaux marneux et argileux. Ces sols ont en commun une texture fine, une richesse en carbonates de calcium, une épaisseur importante et de faibles teneurs en matière organique.

Les engrais azotés ne sont pas retenus dans le sol et les excès peuvent être entraînés par l'eau. Les engrais phosphatés, par contre, sont moins mobiles et plus exposés à la rétrogradation en formes insolubles (Arvieu et Bouvier, 1974; Zantour, 1989; Ghazanshahi et Jaouich, 2001) dans ces types de sols. Les « recettes » en fertilisation phosphatée appliquées par les agriculteurs suffisent-elles pour combler les besoins des cultures ou sont-elles excédentaires? Comment évolue la fraction dite assimilable au cours de la campagne agricole et quel est son ordre de grandeur par rapport aux normes recommandées pour les cultures

1. Direction des sols, ministère de l'Agriculture, de l'Environnement et des Ressources hydrauliques, Tunisie.

*Auteur pour la correspondance : téléphone : 216 71887383, télécopieur : 216 71891516, courriel : habibbenhassine2001@yahoo.fr ou h.benhassine.02@webmails.com

céréalières? Le bilan annuel entre réserves totales dans le sol et exportations des cultures serait-il positif ou négatif? Comment évoluent les excès et quels sont les risques encourus par le sol et le milieu s'ils existent?

L'actuelle étude se propose d'aborder ces questions à travers le diagnostic d'une série d'analyses effectuées sur des unités de sols représentatives des milieux céréalières du Nord-Ouest tunisien pour tenter de suivre l'évolution des réserves en cet élément et d'évaluer leur disponibilité pour les cultures aux cours des mois de l'année. Une telle démarche est conçue à partir des recommandations de Giroux et Tran (1994) qui stipulent que « l'approche du bilan, combinée à un suivi régulier des analyses de sol, constitue la façon la plus efficace pour juger des équilibres nutritifs du sol et de l'évolution de la fertilité des sols ».

Matériel et méthodes

Situation géographique des sols

Les sols étudiés sont situés dans le Nord-Ouest tunisien caractérisé particulièrement par l'affleurement des chaînes montagneuses de la dorsale, du haut Tell et de la Kroumirie-Mogods. L'émergence de ces reliefs a édifié des plaines intermontagneuses qui ont été progressivement comblées par les produits d'altération des roches affleurant sur ces reliefs. L'érosion a aussi agi sur les reliefs de faible altitude où émergent des marnes et des argiles pour les transformer en des monticules à sommets arrondis à légèrement aplatis sur lesquels des activités culturales sont facilement réalisables.

Types de sols étudiés

Ils ont été choisis parmi les plus aptes à la production céréalière et réunissent ainsi des propriétés intrinsèques et environnementales très favorables à ces types de production. Ce sont des sols profonds,

de texture fine, carbonatés à et faible teneur en matière organique. Cette dernière subit une forte minéralisation par les actions de mise en cultures mais se renouvelle à travers les résidus des cultures avec des quantités souvent insuffisantes, ce qui se répercute négativement sur la structure de certains types de sols (Ben Hassine, 2002). Pour réaliser cette étude, quatre types de sols ont été retenus, à raison de deux par milieu bioclimatique :

En milieu subhumide, près de la ville de Béja, un vertisol à drainage externe possible, non grumosolique et un sol peu évolué non climatique, d'apport alluvial;

En milieu semi-aride, près de la ville du Kef, un sol brun isohumique à complexe saturé évoluant sous pédoclimat à hiver frais et un sol peu évolué non climatique, d'apport alluvial.

Ces quatre types de sols présentent tous une texture fine et une richesse particulière en carbonates de calcium. Seul le sol brun isohumique du milieu semi-aride, se caractérise par une décarbonatation des 50 à 60 centimètres supérieurs; le calcaire entraîné s'accumule en des formes discontinues dans l'horizon C.

Il est à noter que le vertisol et le sol brun isohumique présentent une structure plus développée et plus stable que les sols peu évolués dont la structure de l'horizon de surface est peu édifiée.

Prélèvements d'échantillons

Les prélèvements d'échantillons ont été effectués au cours de quatre campagnes agricoles avec une périodicité qui varie entre un, deux ou trois mois. Cette périodicité est plus courte au cours des deux premières campagnes (1996-1997 et 1997-1998); elle s'est stabilisée à trois mois au cours des deux campagnes suivantes (1999-1999 et 1999-2000). Le prélèvement est réalisé à la tarière sur 40 cm de profondeur et sur deux tranches de 20 cm. Il a concerné deux parcelles de chaque type de sol, traitées différemment du point de vue fertilisation et mise en

culture. Chaque prélèvement a rassemblé 16 échantillons qui ont été placés dans des sacs en plastique puis portés au laboratoire pour analyse. Avant le démarrage des opérations de prélèvement, des mesures de la densité apparente à l'aide de cylindres métalliques de 100 cm³ de volume ont été réalisées sur chaque tranche de 20 cm de chaque type de sol, avec trois répétitions pour chaque niveau.

Pour les plantes, un prélèvement unique a été effectué à la fin de la campagne agricole pour déterminer les quantités de P exportées. Celles-ci doivent servir à évaluer le bilan entre les apports et les exportations.

Cultures introduites et leur fertilisation

Les espèces cultivées sont à cycle hivernal correspondant avec les saisons plus humides du climat méditerranéen. Les semences se font en octobre-novembre et les récoltes généralement en juin. Les cultures occupent ainsi le sol durant 7 à 8 mois. Les quatre mois restants de l'année sont trop secs pour produire des cultures pluviales.

Les espèces les plus couramment employées sont le blé dur, le blé tendre, les fourrages vesce-avoine ou vesce-orge, l'orge et la betterave à sucre. Ces cultures se succèdent sur chaque parcelle selon un plan d'assolement biennal qui emploie une céréale suivie d'un fourrage ou d'une betterave à sucre. Ces plans de rotation ne sont pas toujours respectés par certains agriculteurs propriétaires de petites exploitations.

La fertilisation phosphatée est apportée avec le semis, au début de chaque campagne agricole. En raison des fortes teneurs en calcaire, qui élèvent le pH jusqu'à une valeur de 8 à 8,5, les engrais sont apportés sous forme soluble. Ce sont le phosphate bi-ammoniacal (DAP) et le superphosphate triple. Ces deux engrais contiennent de 45 à 48 % de P₂O₅. Les quantités apportées au cours des quatre campagnes de suivi sont portées au tableau 1. Elles sont présentées directement en kg/ha de P₂O₅.

Il est à remarquer qu'en milieu semi-aride, le sol est géré par des agriculteurs qui souvent n'apportent pas de produits fertilisants.

Analyses de sols

Les échantillons de sols sont séchés à l'air libre puis broyés et tamisés à 2 mm. Les analyses réalisées sur ces échantillons sont (Naânaâ et Susini, 1988) :

- Le phosphore total : extraction par attaque à l'acide perchlorique à 60 % dans un bain de sable. Le dosage colorimétrique a été réalisé à 600 nm;
- Le phosphore assimilable : il est extrait selon la méthode Olsen par le bicarbonate de sodium 0,5 N ajusté au pH = 8,2 par une solution de soude. Le dosage colorimétrique a été réalisé à 600 nm.

Analyses de plantes

Les végétaux prélevés sont nettoyés, séchés dans une étuve, puis broyés. Un gramme de leur poudre est incinéré à 550 °C pendant trois heures. L'extraction de P est réalisée par l'addition de HCl N/5 et une filtration par 100 ml d'eau sur du papier sans cendres. Le dosage a été fait par méthode colorimétrique à une longueur d'onde de 600 nm.

Les quantités de P exportées sont calculées sur le rendement de la culture. Les quantités de P prélevées par les résidus

de récolte sont calculés à partir des indices de récolte qui lient les rendements en grains à la quantité de paille produite. Ces indices de récolte ont été établis par Ben Salem et al. (2000) pour le blé et par El Felah et al. (1991) pour l'orge. Pour la betterave à sucre, la quantité de matière sèche produite est estimée par Pic (1994) à 25 % du poids des racines récoltées.

Résultats

Réserves en phosphore total

Ce sont les réserves des deux tranches supérieures de 20 cm de chaque parcelle qui ont été déterminées. Les graphiques illustrant l'évolution de ces réserves sont groupés dans la figure 1. Elles sont exprimées en mg/kg de P₂O₅ total. Les quantités les plus importantes apparaissent dans le vertisol avec des valeurs se situant entre 1300 et 2400 mg/kg environ. Elles décroissent dans l'ordre dans les sols peu évolués des deux zones bioclimatiques et dans le sol isohumique. Ce phosphore est presque entièrement bloqué sous forme insoluble (Ben Hassine, 2002). La répartition en fonction des types de sols confirme cette constatation : le sol isohumique est décarbonaté en surface; il présente parallèlement les quantités les plus faibles de P₂O₅ total à l'inverse des trois autres types de sols qui sont carbonatés et dont le phosphore

total est en réserves importantes. En conséquence, la présence du calcaire fixe le phosphore sur place et le retient sous une forme insoluble. Il faut ajouter à cela que le sol isohumique est non fertilisé, ce qui doit aggraver l'écart avec les autres types de sols.

Les quantités identifiées sont très largement supérieures aux besoins des cultures pratiquées dans la région (céréales) sous conditions pluviales. L'évolution des réserves n'est pratiquement pas affectée par les exportations des cultures. Les variations annuelles sont donc dues à des questions d'échantillonnage, c'est pourquoi on prendra la moyenne comme paramètre distinctif de chaque parcelle et de chaque type de sol (tableau 2).

Les moyennes les plus fortes correspondent aux parcelles du vertisol, notamment pour l'horizon de surface. Les plus faibles moyennes sont celles du sol isohumique avec des valeurs qui chutent en dessous de 800 mg/kg, surtout dans la parcelle est. Pour les sols peu évolués, les moyennes des parcelles du sol du milieu subhumide sont légèrement supérieures à celles des parcelles du sol du milieu semi-aride. Toutes ces réserves, malgré les écarts qui apparaissent entre les types de sols, sont importantes et dépassent très largement les besoins des cultures.

Le rapport des variances de l'horizon 0-20 cm des parcelles de chaque type de sol (F) est compris entre 0,487 pour le

Tableau 1. Rotation des cultures et fertilisation phosphatée appliquée aux sols au cours des quatre campagnes d'étude (kg/ha de P₂O₅).

Zone bioclimatique	Type de sol	Parcelle	Campagnes agricoles			
			1996-1997 Culture kg P205/ha	1997-1998 Culture kg P205/ha	1998-1999 Culture kg P205/ha	1999-2000 Culture kg P205/ha
Subhumide Béja	Sol peu évolué	Est	Vesce-orge 36	Blé dur 64,8	Vesce-avoine 45	Blé dur 54
		Ouest	Betterave à sucre 90	Blé dur 138,6	Blé tendre 90	Vesce-avoine 62,1
	Vertisol	Nord	Blé dur 97,7	Betterave à sucre 90	Blé dur 74,3	Blé tendre 67,5
Sud		Fourrage (Bersim) 86	Blé dur 90	Betterave à sucre 90	Blé dur 67,5	
Semi-aride Le Kef	Sol peu évolué	Nord	Blé dur	Blé dur 45	Jachère	Blé dur 22
		Sud	Jachère	Orge	Jachère	Jachère
	Sol isohumique	Ouest	Blé tendre	Orge	Jachère	Orge
Est		Orge	Blé dur	Blé dur	Blé dur	

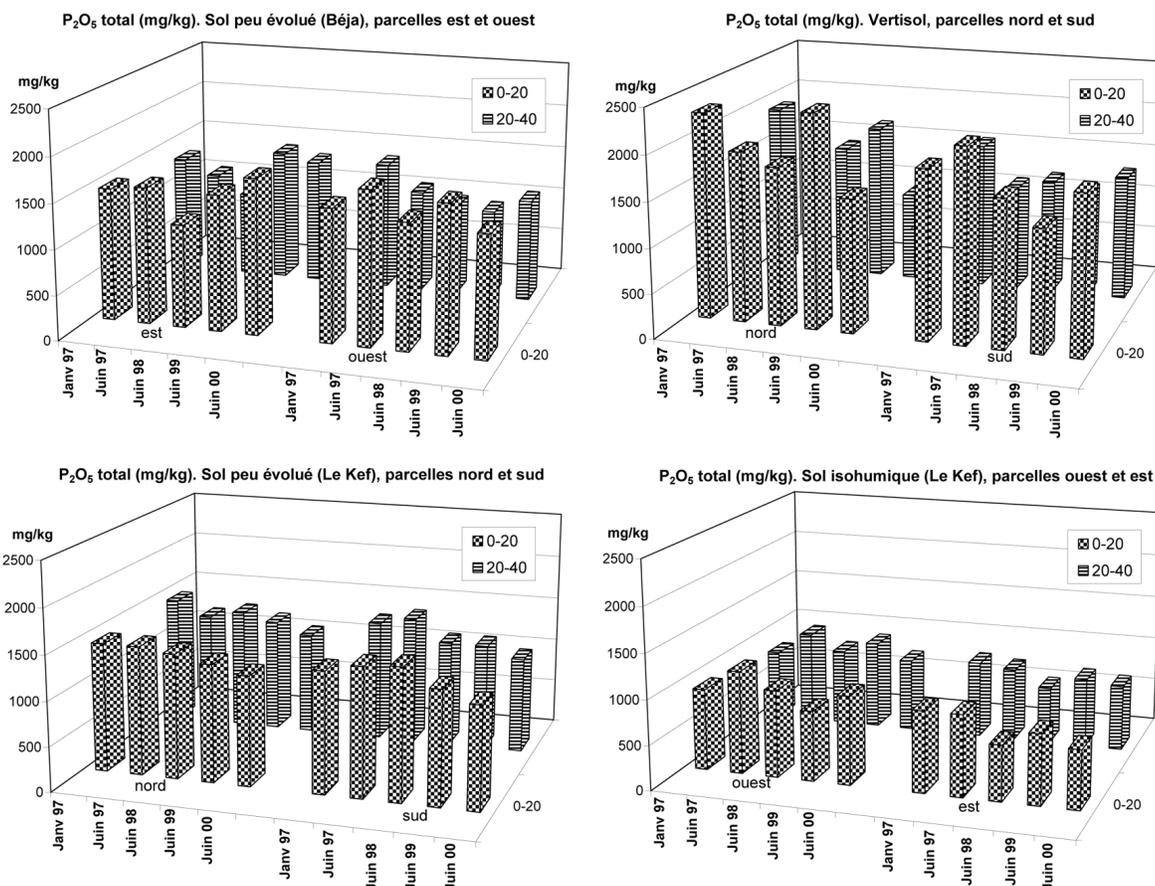


Figure 1. Évolution des réserves annuelles en P₂O₅ total (mg/kg) des horizons 0-20 et 20-40 cm des parcelles de sols étudiés. Période 1997-2000.

Tableau 2. Comparaison des variances des réserves en P₂O₅ total des deux parcelles de chaque type de sol.

Profondeur	Parcelle	Moyenne m (mg/kg)	Ecart-type	Variance	Rapports des variances (F)	Domaine d'acceptation		Observations
						F 0,95 à 4 ddl	F 0,05 à 4 ddl	
0-20 cm	SPE, Béja est	1475,1	208,5	43483,7	1,842	0,013	76,1	Compris dans le domaine
	SPE, Béja ouest	1513,0	153,6	23605,9				
	Vertisol nord	1961,4	371,0	137649,2	1,610	0,013	76,1	«
	Vertisol sud	1754,0	292,4	85517,3				
	SPE, Kef nord	1361,2	91,6	8392,5	0,487	0,013	76,1	«
	SPE, Kef sud	1335,0	131,3	17235,8				
	S. isoh. ouest	957,9	132,4	17542,4	0,958	0,013	76,1	«
	S. isoh. est	773,4	135,3	18313,3				
20-40 cm	SPE, Béja est	1256,6	212,6	45181,7	1,477	0,013	76,1	«
	SPE, Béja ouest	1149,9	174,9	30597,1				
	Vertisol nord	1582,6	367,3	134875,3	3,837	0,013	76,1	«
	Vertisol sud	1338,0	187,5	35147,7				
	SPE, Kef nord	1294,7	108,4	11752,0	0,545	0,013	76,1	«
	SPE, Kef sud	1247,0	146,9	21569,0				
	S. isohum ouest	897,4	108,5	11765,4	1,571	0,013	76,1	«
	S. isohum est	769,1	86,6	7491,1				

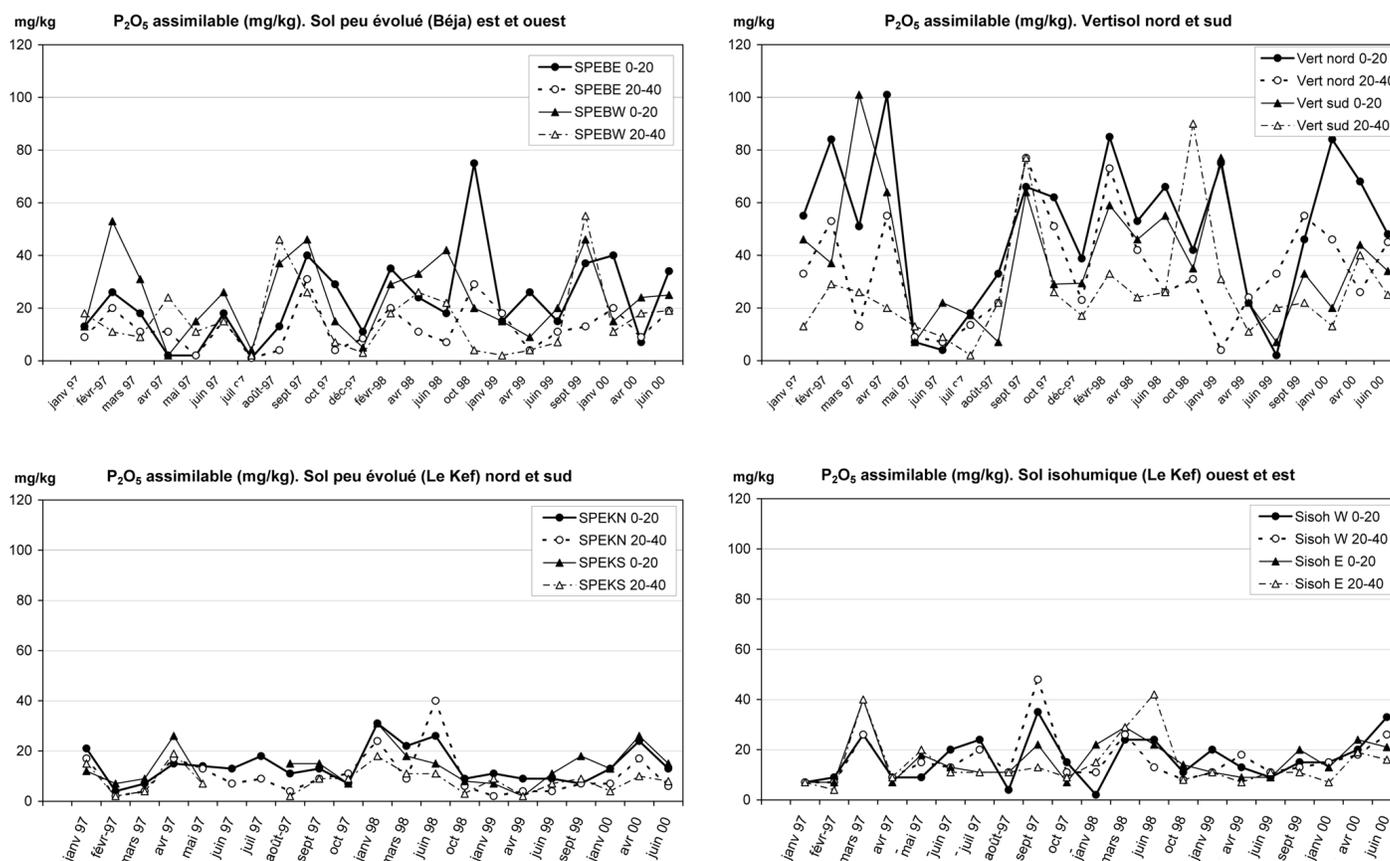


Figure 2. Évolution des réserves en P_2O_5 assimilable (mg/kg) des horizons 0-20 et 20-40 cm des parcelles de sols étudiés. Période : 1997-2000.

sol peu évolué du milieu semi-aride et 1,842 pour le sol peu évolué du milieu subhumide. Pour l'horizon 20-40 cm, il est compris entre 0,545 pour le sol peu évolué du milieu semi-aride et 3,837 pour le vertisol (tableau 2). Toutes ces valeurs sont comprises dans le domaine d'acceptation établi entre les seuils $p = 0,05$ et $p = 0,95$ sur la table de Fisher-Snédecor. En conséquence, les variations entre les réserves des parcelles de chaque type de sol ne sont pas nettement différentes et ne sont pas fortement affectées, ni par les différences de fertilisation, ni par celles des mises en culture. Les réserves en P_2O_5 total semblent donc tellement importantes qu'elles ne subissent pas, à court terme, l'effet des apports d'engrais ou celui des exportations par les cultures. Cependant, à plus long terme, les variations pourraient se manifester plus nettement.

D'après ces résultats, les réserves ne diffèrent pas tellement au sein d'un même type pédogénétique de sol. En conséquence, chaque type pédogénétique de chaque bioclimat se caractérise par des valeurs homogènes et spécifiques concernant les réserves en P_2O_5 total. Un résultat similaire a été obtenu au Québec, mais sur des sols lessivés et acides (Vézina et al., 2000).

Réserves assimilables

Les réserves assimilables ont été suivies entre janvier 1997 et juin 2000, avec une périodicité plus restreinte au cours des deux premières campagnes (1996-1997 et 1997-1998), qui devient plus régulière et trimestrielle au cours des deux dernières campagnes (1998-1999 et 1999-2000). Les quantités les plus importantes ont été observées dans les sols du milieu subhumide et particulièrement

les vertisols (figure 2). En effet des pics qui atteignent même les 100 mg/kg apparaissent dans les deux parcelles de ce type de sol qui se caractérise par la chute de ses réserves en période de fin de campagne. Dans le sol peu évolué, des augmentations des réserves sont sensiblement visibles surtout après les mois automnaux, période au cours de laquelle, les produits fertilisants sont ajoutés au sol. Les chutes de ces réserves ne correspondent pas toujours aux périodes de fin de campagne.

En milieu semi-aride, les réserves évoluent pratiquement au niveau et en dessous de 20 mg/kg de P_2O_5 . Quelques pics atteignent les 40 mg/kg mais ne correspondent pas à des périodes de fertilisation (figure 2). Il est à rappeler que les sols de ce milieu ne sont pas ou ne sont que peu fertilisés.

Tableau 3. Méthode d'appariement appliquée aux valeurs de P₂O₅ assimilable pour chaque couple de parcelles de chaque type de sol. Période : 1997-2000.

Type de sol	Parcelle	Moyenne m (mg/kg)	Écart-type	Moyennes des écarts x	s* des écarts	k	t'	t sur la table de Student
Sol peu évolué Béja	Est	17,65	11,77	-2,4	15,03	22	0,789	2,080
	Ouest	20,07	12,46					
Vertisol Béja	Nord	42,55	21,54	9,7	19,89	22	2,287	2,080
	Sud	32,83	18,08					
Sol peu évolué, Le Kef	Nord	12,34	7,93	1,26	5,72	19	0,960	2,101
	Sud	11,08	5,86					
Sol isohumi- que, Le Kef	Ouest	16,21	8,74	0,786	8,86	21	0,396	2,086
	Est	15,41	9,0					

$$*s = [\sum(xi - x)^2 / k-1]^{1/2}$$

En conséquence, les sols du milieu subhumide sont mieux pourvus en P₂O₅ assimilable. Ceci est probablement le résultat d'une plus intense fertilisation qui prend le caractère régulier, tout au moins au cours de la période d'observation. L'évolution temporelle des valeurs de P₂O₅ assimilable est très irrégulière (figure 2), notamment pour les sols du milieu subhumide (sol peu évolué (Béja) et vertisol) qui sont régulièrement fertilisés. Cette variation est moins perceptible dans les sols du milieu semi-aride dont les quantités en P₂O₅ sont plus faibles, ce qui se répercute sur les intervalles de fluctuation qui sont moins grands.

Pour étudier l'effet des engrais sur les réserves assimilables en P₂O₅, la méthode statistique d'appariement de chaque couple de parcelles du même type de sol est appliquée. L'hypothèse émise est que chaque couple de parcelles ayant des propriétés édaphiques similaires, puisqu'il appartient au même type de sol, aurait des teneurs en P₂O₅ assimilable sensiblement égales. La méthode employée retient la variance des écarts (xi) entre les teneurs en P₂O₅ des deux parcelles comme paramètre essentiel à partir duquel le facteur (t' = x/s/k^{1/2}) est calculé, puis comparé à la valeur de t sur la table de Student à k-1 ddl et au seuil 0,05 (tableau 3). Il est à noter que les données de chaque parcelle ont été réduites en une moyenne des 40 premiers centimètres qui est le résultat d'une somme des deux valeurs divisées par deux.

L'application de cette méthode montre, selon les résultats obtenus (tableau 3), que l'évolution des réserves des deux parcelles est similaire dans trois types de sols pour lesquels le facteur t' est inférieur à t. Ces trois types sont les sols peu évolués des deux zones bioclimatiques et le sol isohumique. Pour le vertisol, t' est supérieur à t et indique qu'il y a 95 % de chance pour que la similitude des réserves entre ses deux parcelles soit fautive. Ceci explique que les réserves du sol ont été modifiées dans les deux parcelles par les apports annuels d'engrais phosphatés. Ces derniers n'ont apparemment agi que sur le vertisol qui, grâce à sa structure bien développée et stable, garde des fractions assimilables plus élevées et plus longtemps et la rétrogradation apatitique se produirait plus lentement.

En effet, la structure du sol traduit une bonne qualité de la fraction humique avec des argiles qui s'associent entre elles et avec la matière organique en des particules stables. La présence de ces colloïdes doit agir pour retenir des quantités de P non négligeables par l'intermédiaire des cations. Les moyennes des 22 valeurs rassemblées au cours des quatre campagnes de suivi confirment la plus forte abondance de P₂O₅ assimilable dans le vertisol (tableau 3). Ces valeurs doivent évoluer avec des écarts importants puisque les écarts-types dépassent 50 % de la moyenne. Cette observation est d'ailleurs générale pour les quatre types de sols.

Corrélation entre P₂O₅ assimilable et total

Cette corrélation est établie sur la totalité des résultats disponibles, c'est à dire en rassemblant les quatre types de sols et en cherchant l'équivalent de la réserve totale annuelle sur 40 cm de profondeur par la moyenne annuelle des réserves assimilables, sur la même épaisseur. Trente-deux couples de valeurs sont ainsi obtenus, soit 32 ddl. La droite de régression et le coefficient de corrélation obtenus (figure 3) confirment l'existence de liens entre les deux formes du phosphore dans ces sols qui ont beaucoup de ressemblances entre eux. En effet, le coefficient r = 0,403 est significatif au seuil 0,05, ce qui indique qu'il y a 95 % de chance que le P₂O₅ assimilable soit directement issu du P₂O₅ total. Ainsi, et d'après ce résultat, plus les réserves totales sont abondantes, plus les plantes auront à leur disposition d'importantes quantités de phosphore.

Le coefficient de détermination fait cependant apparaître que la variation de P₂O₅ total n'explique que 16,3 % de la variation de P₂O₅ assimilable. Les principaux facteurs qui interviennent pour réduire la dépendance entre les deux fractions pourraient être :

- Une plus forte importance du P bloqué en forme insoluble par rapport au P fixé sur les sites d'échange et celui dissous dans la solution;

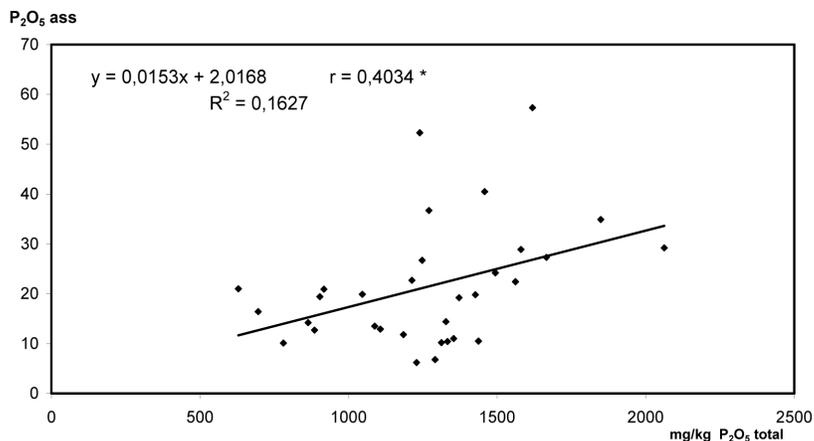


Figure 3. Corrélation entre les réserves annuelles en P₂O₅ total (mg/kg) et les moyennes annuelles des réserves en P₂O₅ assimilable (mg/kg) des 40 cm supérieurs du sol (* : p = 0,05).

- La faible teneur en matière organique des sols étudiés, ce qui rendrait la fraction de P organique négligeable par rapport au P total;
- La présence excessive de carbonates de calcium dans ces sols qui fait que le principal agent de fixation du phosphore est le calcaire, loin devant les autres sites de fixation.

Corrélation entre les apports d'engrais et le P₂O₅ assimilable

Cette corrélation est établie dans le but de déterminer si l'apport d'engrais agit favorablement ou non sur l'amélioration des réserves assimilables des sols. Pour cette raison, on a pris l'apport d'engrais évalué en kg de P₂O₅/ha d'une part, et d'autre part, la réserve du sol en P₂O₅ assimilable sur 40 cm d'épaisseur pour les mois de janvier, avril et juin (tableau 4). Ces mois suivent en effet la période d'épandage de l'engrais qui est

réalisée avec le semis, soit en octobre-novembre. Une telle démarche a pu rassembler 17 couples de valeurs pour chaque période. Le nombre est inférieur à 32 à cause du manque de fertilisation dans les sols du milieu semi-aride.

De tels résultats (tableau 4) confirment que la fraction assimilable n'est pas totalement améliorée, mais elle peut l'être partiellement. Par ailleurs, l'écart entre la période de fertilisation et celle de l'analyse est d'au moins trois mois (pour janvier). Un tel écart peut suffire pour qu'une partie de l'engrais soluble soit directement absorbée par les plantes dans les solutions ou rétrogradée en apatite par le calcium du calcaire qui est fortement abondant dans ces sols.

Bilan entre apports d'engrais phosphatés et exportations des cultures

Ce bilan est établi entre les quantités en P₂O₅/ha exportées par les cultures, déter-

minées par l'analyse de l'élément P sur la matière sèche à la fin de la campagne, d'une part, et les apports d'engrais phosphatés minéraux transformés en kg de P₂O₅/ha d'autre part. Les résultats révèlent les constatations suivantes (figure 4) :

- La fertilisation est régulière et continue pour les deux types de sols du milieu subhumide. Elle n'existe pratiquement pas pour le sol isohumique et elle est irrégulière et discontinue pour le sol peu évolué du milieu semi-aride;
- Le maximum de fertilisation atteint presque 140 kg de P₂O₅/ha; il est observé dans la parcelle ouest du sol peu évolué du milieu subhumide au cours de la campagne 1997-1998 pour une culture de blé dur;
- Les apports d'engrais ont toujours dépassé les exportations. Les excès dépassent souvent le double les quantités extraites par les cultures. Ceci explique que les « recettes » appliquées par les fermiers chargent les sols en des quantités excédentaires dont la destinée est probablement la rétrogradation en des formes inaccessibles pour les plantes sous l'action des carbonates de calcium;
- Le bilan dans le sol isohumique est négatif du fait de l'absence de fertilisation phosphatée minérale. Les quantités évaluées sont cependant très faibles et ne représentent qu'une petite fraction des réserves totales du sol.

Il s'avère ainsi que les sols, s'ils sont fertilisés, reçoivent des excédents phosphatés qui doivent être réduits et équilibrés avec les exportations. De tels excès peuvent avoir des conséquences négatives sur l'environnement en provoquant l'eutrophisation des eaux de ruissellement qui devraient rejoindre des retenues dans l'aval du bassin versant. Pour les sols, ces excédents ne sont pas nocifs ou dangereux puisqu'ils doivent évoluer naturellement vers une forme apatitique insoluble.

Tableau 4. Coefficients de corrélation et de détermination entre les apports annuels d'engrais (kg P₂O₅/ha) et les réserves en P₂O₅ assimilable (mg/kg) au cours de trois mois de la campagne agricole.

Période	Coefficient de corrélation r	Coefficient de détermination R ²	ddl	Seuil de signification
Janvier	0,245	0,191	17	NS
Avril	0,414	0,270	17	NS
Juin	0,090	0,011	17	NS

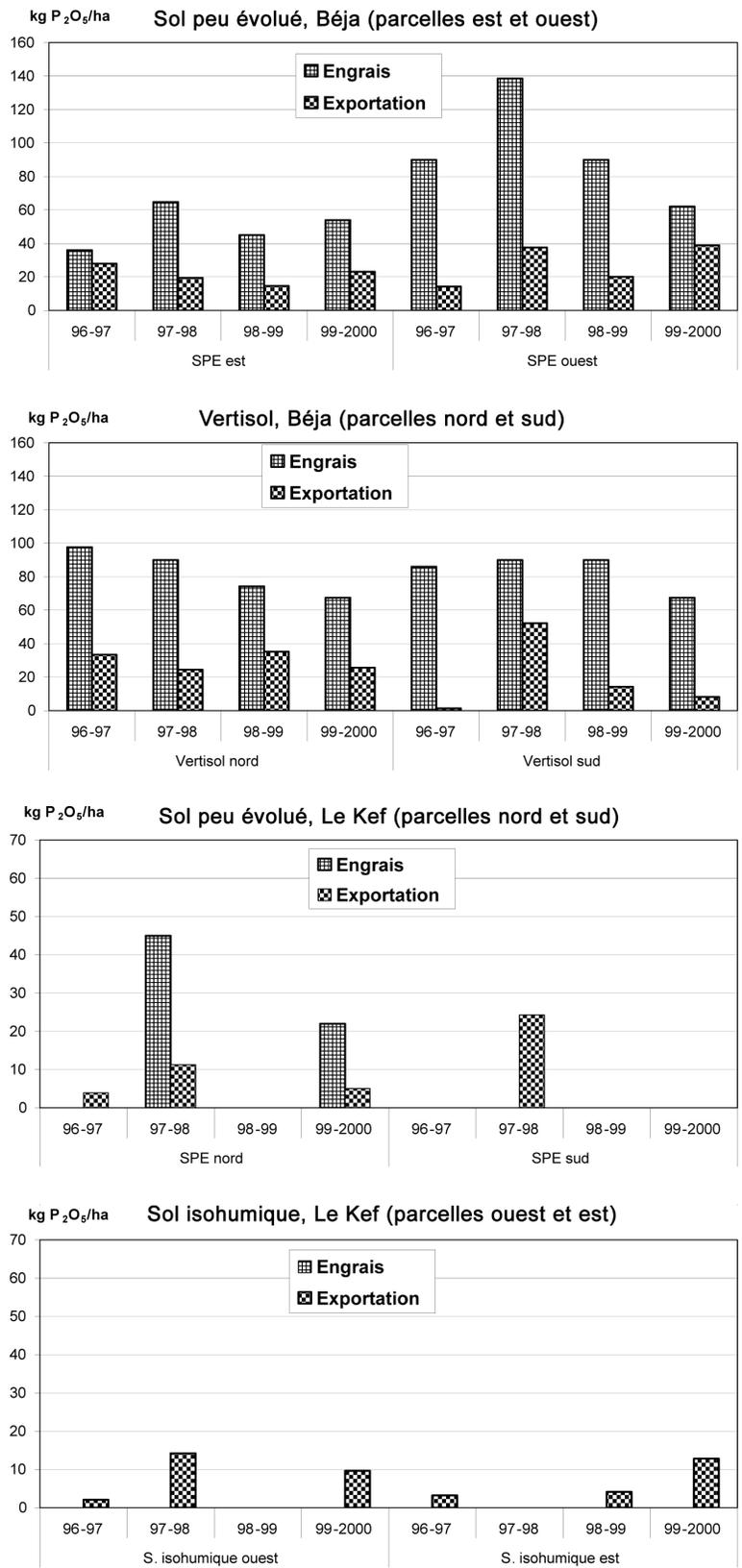


Figure 4. Bilan entre apports par les engrais et exportations par les cultures, du phosphore P₂O₅ en kg/ha.

Discussions

L'engrais phosphaté est appliqué au début de chaque campagne agricole sous forme soluble. Les pluies automnales et hivernales se chargent de le mettre en solution. Les plantes, en début de croissance, peuvent profiter directement du P en solution mais les formes solubles évolueraient progressivement vers des formes insolubles. La fixation du P se fait par adsorption sur la matière organique et les minéraux argileux du sol mais également par précipitation avec les oxydes de fer ou d'aluminium et les carbonates. Une concurrence s'exerce dans les sols entre plusieurs facteurs pour déterminer l'évolution du P vers des formes labiles ou non-labiles. Le P dit assimilable extrait selon la méthode Olsen devrait, dans ces conditions, être constitué principalement de P adsorbé sur les argiles et l'humus ainsi que celui de la solution. Le suivi mensuel, puis trimestriel, réalisé sur les sols étudiés indique une augmentation des réserves assimilables juste après la fertilisation. Ces réserves, bien que très fluctuantes d'un prélèvement à l'autre, tendent à diminuer à la fin de la campagne, notamment pour le vertisol.

La forme assimilable ne semble pas tenir longtemps puisque, dès le mois de janvier, l'engrais n'a plus d'effet sur la fraction dite assimilable dans les sols étudiés. Pour les mois d'avril et de juin suivants, le résultat a été le même. On devait donc attribuer un tel résultat à l'évolution apatitique rapide des engrais solubles qui sont souvent apportés sous forme de DAP. Cet engrais est mieux approprié aux sols calcaires que le phosphate monocalcique qui précipite en phosphate bicalcique puis en phosphate octocalcique (Arvieu et Bouvier, 1974). Malgré ces évolutions, les réserves en P assimilable sont sensiblement plus élevées dans les sols fertilisés que dans ceux non fertilisés, ce qui doit accroître les potentialités de production céréalière de ces sols. A l'état fixé par la rétrogradation tricalcique, le phosphore n'est plus soluble. Cependant, même si les quantités de P total augmentent dans le sol, elles ne seraient pas nécessairement retenues en

totalité sous forme insoluble. Les autres formes de fixation de P doivent augmenter à leur tour. Ceci a été démontré par la corrélation partiellement significative entre le P assimilable et le P total pour toutes les données réunies. Pour l'ensemble des sols, fertilisés ou non, la relation a montré que dans 95 % des cas, le P assimilable dépend de la quantité de P total dans le sol. Par conséquent, si les réserves totales sont importantes dans certains types de sols, elles devraient avoir un impact positif sur les cultures. Elles seraient, en revanche, nuisibles pour l'environnement, puisque des particules phosphatées insolubles peuvent être véhiculées à l'état de suspension dans les eaux de ruissellement, et rejoindre les barrages d'eaux destinées à la consommation humaine et animale. Des mesures de protection des sols agricoles contre l'érosion hydrique dans ces régions céréalières sont recommandées. L'un des moyens les plus efficaces de protection de ces sols est l'augmentation de leurs teneurs en matière organique qui améliore leur structure, augmente leur perméabilité et assure une protection partielle du phosphore contre la rétrogradation apatitique en fixant une partie des engrais sous une forme plus accessible aux plantes. Les amendements organiques apportent à leur tour du phosphore qui est libéré en petites quantités ce qui le rend, à l'inverse de celui des engrais, moins exposé à l'immobilisation par le calcium (Moughli, 2004). Des apports de boues de stations d'épuration ont montré leur efficacité (Vanden Bossche, 2003).

Le calcul des bilans entre les apports d'engrais et les exportations des cultures a montré qu'ils sont toujours positifs et les entrées dépassent largement les sorties dans les sols fertilisés. De tels apports contribuent progressivement à accroître les réserves totales dans les sols. Ceci est d'ailleurs visible dans les larges écarts entre les sols du milieu subhumide régulièrement fertilisés, et les sols du milieu semi-aride non ou très peu fertilisés. Ces apports sont inutiles puisqu'ils vont évoluer en majorité vers la forme rétrogradée apatitique et constituer un facteur nuisible pour le milieu environnant. En effet,

il a été démontré sur des sols de Bretagne que des pertes par ruissellement et érosion peuvent atteindre 10 kg/ha de P et même plus au cours d'averses exceptionnelles, avec une période de retour de 20 ans (Aurousseau, 1999). Ces applications augmentent en outre les coûts de production sans toutefois accroître les rendements, puisque le maximum de rendement est obtenu par des quantités plus faibles d'engrais. L'application des « recettes » de fertilisation ne peut être continue et automatique. Il faut se baser sur une analyse rapide des sols pour déterminer la fraction de P assimilable au début de la campagne. Ceci permettra de calculer les quantités à apporter pour combler les déficits, par rapport à une norme calculée, pour des sols de nature similaire. Ainsi, des plans de fumure peuvent être établis en ajustant les doses à apporter en fonction des résultats d'analyses de chaque campagne. C'est la seule possibilité de réduire les coûts de production car il a été démontré qu'on ne peut pas faire d'économies sur le choix des engrais, à l'exception des scories qui sont peu solubles et non conseillées pour les sols calcaires (Hébert, 1975).

Si les réserves totales sont élevées dans les sols fertilisés, elles ne sont pas négligeables dans les sols non ou peu fertilisés du milieu semi-aride; en revanche, seule une faible proportion est assimilable. Les teneurs en P_2O_5 assimilable ont été de l'ordre de 16 mg/kg dans l'horizon de surface (0-20 cm) du sol isohumique et de 14 mg/kg dans le même horizon du sol peu évolué (moyennes de toute la période de suivi). La fertilisation de ces sols est donc nécessaire pour porter ces valeurs aux normes recommandées pour les cultures céréalières. Ces normes ont été proposées par divers auteurs cités par Zaïer (1988). La déficience actuelle en P doit s'ajouter aux plus faibles hauteurs pluviométriques pour réduire davantage les rendements dans ces zones plus méridionales. Ces rendements ont été nettement plus faibles que ceux des sols du milieu subhumide, au cours de la période de suivi et d'observation (Ben Hassine et al., 2001). Les meilleurs rendements sont obtenus au prix de fortes doses d'engrais phosphatés miné-

raux dont la limitation des quantités ne pourrait être contrôlée que par la mise en place d'une législation prescrivant aux agriculteurs les modalités de fertilisation selon les sols, les cultures et les zones bioclimatiques.

Conclusion

Quatre types de sols parmi les sols les plus aptes aux cultures céréalières et qui présentent plusieurs propriétés communes, dont particulièrement la nature de leurs constituants minéraux et organiques, ont été suivis au cours de quatre campagnes agricoles pour étudier l'évolution des réserves phosphatées totales et assimilables. Ces quatre types de sols sont répartis dans les zones bioclimatiques subhumide et semi-aride du Nord-Ouest tunisien à raison de deux par zone. Les deux types de sols du milieu subhumide sont régulièrement fertilisés au début de chaque campagne céréalière à l'inverse des sols du milieu semi-aride qui ne sont pas fertilisés ou qui le sont que rarement. Ceci a provoqué une forte augmentation des réserves totales en P dans les sols du milieu subhumide et particulièrement le vertisol. Les quantités de P assimilable se sont avérées proportionnelles à celles du P total et de facto, leurs réserves sont plus importantes dans les sols du milieu subhumide, ce qui constitue un facteur supplémentaire favorisant la production céréalière dans cette zone bioclimatique. En revanche, les faibles réserves, surtout en P assimilable, s'ajoutent aux insuffisances pluviométriques pour réduire davantage le niveau de production en milieu semi-aride.

Le phosphore assimilable n'est pas stable au cours du temps et a tendance à diminuer plusieurs mois après la fertilisation, ce qui justifie les apports d'engrais minéraux dans ces sols calcaires. Cette fertilisation est actuellement appliquée avec des doses excédentaires qu'il sera utile de réduire en tenant compte des rendements attendus et des réserves en P du sol au début de la campagne agricole.

Références bibliographiques

- Arvieu J.C. et Bouvier O. 1974. Les processus chimiques de l'évolution des phosphates en sols calcaires. *Science du sol*, n° 4, 1974, pages : 207-224.
- Aurousseau P. 1999. Le phosphore dans les sols. Conseil scientifique régional de l'environnement de Bretagne. Article Internet, 5 pages.
- Ben Hassine H. 2002. Etude de l'évolution des propriétés chimiques et physico-hydriques des principaux types de sols céréaliers du Nord-Ouest tunisien. Effets sur les productions céréalières. Thèse, Université de Provence, Aix-Marseille I, 299 pages.
- Ben Hassine H., Gasmî M., Aloui H., Marzougui M., Amdouni M. et Younsi A. 2001. Suivi de l'évolution des réserves en phosphore assimilable et en potassium échangeable dans quatre types de sols céréaliers de Béja et du Kef. Résultats des campagnes agricoles 96-97, 97-98, 98-99 et 99-2000. ES 314, Direction des sols, ministère de l'Agriculture, Tunisie, 26 pages.
- Ben Salem M., Deghaïes M. et Slama A. 2000. Evaluation de la stabilité de la production en grains d'une collection de blé tendre : comparaison des résultats agronomiques aux résultats de quelques paramètres agrophysiologiques. 7èmes Journ. sci. AUPELF-UREF, Montpellier, France, 14 pages.
- El Felah M., Chabbi N. et El Guezzah M. 1991. Analyse de l'adaptation à l'aridité de quelques ressources génétiques locales d'orge (*Hordeum vulgare* L.) comparativement à des variétés améliorées. In : L'amélioration des plantes pour l'adaptation aux milieux arides. Ed. AUPELF-UREF, John Libbey Eurotext, Paris, 1991, pp : 197-209.
- Ghazanshahi D. et Jaouich A. 2001. Effet du pH sur la solubilité du phosphore dans les sols calcaires du nord de Varamine (Iran). *Revue Agrosol*, vol. 12, n° 1, 2001, Sainte-Foy, Québec, Canada, pages : 21-24.
- Giroux M. et Tran T.S. 1994. Etude des facteurs affectant l'évolution des teneurs en P et K des sols agricoles. *Revue Agrosol*, vol. 7, n° 2, 1994, Sainte-Foy, Québec, Canada, pages : 23-30.
- Hébert J. 1975. Evolution des charges dues aux engrais dans les différents systèmes d'exploitation. *Science du sol*, n° 2, 1975, pages : 113-124.
- Ministère du Développement économique (République tunisienne). 1995. Enquête nationale sur le budget, la consommation et le niveau de la vie des ménages. Volume B. Résultats de l'enquête alimentaire et nutritionnelle
- Moughli L. 2004. Fertilité du sol et contrôle de la pollution. Le phosphore. Département des sciences du sol, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc. Article Internet, 5 pages.
- Naânaâ W. et Susini J. 1988. Méthodes d'analyse physique et chimique des sols. ES 252, Direction des sols, ministère de l'Agriculture, Tunisie, 118 pages.
- Pic G. 1994. La betterave sucrière en Tunisie. Centre betteravier de Bou Salem - Complexe sucrier de Tunisie - GTZ.
- Vanden Bossche H. 2003. Devenir du phosphore apporté sur les sols et risques de contamination des eaux de surface. Cas des boues de stations d'épuration. Mémoire du CAREN, n° 2, ISBN 2-914375-08-5, 388 pages.
- Vézina L., Carrier D., Giroux M., Rompré M., Laflamme G. et Moreau A. 2000. Proposition de regroupement des sols du Québec selon leur capacité de fixation du phosphore en relation avec leurs caractéristiques pédologiques. *Revue Agrosol*, vol. 11, n° 1, 2000, Sainte-Foy, Québec, Canada, pages : 15-25.
- Zaïer M. 1988. Appréciation de la fertilité phosphato-potassique du sol : problématique et normes d'interprétation. ES 247, Direction des sols, ministère de l'Agriculture, Tunisie, 44 pages.
- Zantour M. 1989. Evolution des fumures phosphatées dans les sols calcaires. Bulletin « Sols de Tunisie », n° 13. Direction des sols, ministère de l'Agriculture, Tunisie, pages : 151-165.