

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE AUX UNIVERSITES ET A LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE D'EL-HARRACH

**Thèse en vue de l'obtention du diplôme de Magister
en Sciences Agronomiques**

Option : Aménagement et Mise en Valeur (Science du Sol)

Amina ALI-HAIMOUD - BESSAFA

THEME

**Etude expérimentale de l'action des phosphates
naturels de Djebel Onk dans la nutrition
des plantes.**

Soutenue en Décembre 1995 devant le jury composé de :

Mr Y. DAOUD

Président

Mr A. HALITIM

Directeur de thèse

Mr M. MESSAHEL

Examineur

Mr S. BENAMARA

Examineur



32 - 630 - 457 - 1

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE AUX UNIVERSITES ET A LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE D'EL-HARRACH

Thèse en vue de l'obtention du diplôme de Magister
en Sciences Agronomiques

Option : Aménagement et Mise en Valeur (Science du Sol)

Amina ALI-HAIMOUD - BESSAFA

THEME

**Etude expérimentale de l'action des phosphates
naturels de Djebel Onk dans la nutrition
des plantes.**

Soutenue en Décembre 1995 devant le jury composé de :

Mr Y. DAOUD	Président
Mr A. HALITIM	Directeur de thèse
Mr M. MESSAHEL	Examineur
Mr S. BENAMARA	Examineur

Ce travail est dédié à :

mes parents

Braham

Abdeldjalil

Wafa

ERRATA

- PAGE 56 : 10 ème ligne : le mot acide est écrit deux fois.
- PAGE 57 : 56 ppm = 56 mg/1000 g au lieu de 56 mg/ 1000 mg.
- PAGE 58 : 13 ème ligne : X.100/45 g de TSP / 100 g de sol. A effacer la suite.
- PAGE 81 et 82 à inverser.
- PAGE 83 : dans le titre dépoussiérés et non dépoussiérées.
- PAGE 108 : 7ème ligne avant la fin , assimilation.
- PAGE 124 : 9 ème ligne, ...et place la vesce en première position devant l'orge.
- PAGE 131 : 6 ème ligne avant la fin , l'effet hautement significatif et non très hautement significatif.
- PAGE 157 : la dernière phrase à éliminer.
- PAGE 159 : 16 ème ligne Ca et Na.
- PAGE 161 : 7ème ligne avant la fin , différents.
- PAGE 163 : 10 ème ligne , obtention et non obtention.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.

PREMIERE PARTIE : DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES.

CHAPITRE I : Importance de l'élément phosphore.

CHAPITRE II : Utilisation du phosphore dans la fertilisation.

CHAPITRE III : Facteurs intervenant sur l'assimilabilité des phosphates naturels.

CHAPITRE IV : Origine et utilisations potentielles du phosphogypse.

DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES.

CHAPITRE V : Matériel d'étude.

CHAPITRE VI : Méthodologie d'étude.

TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET INTERPRETATION.

CHAPITRE VII : Effet des mélanges phosphates naturels / phosphogypse sur la solubilité et la disponibilité du phosphore.

CHAPITRE VIII : Effet des Mélanges refus dépoussiérés / phosphogypse sur la solubilité et la disponibilité du phosphore.

CHAPITRE IX : Relation sol-plante-type de fertilisants.

CHAPITRE X : Influence de la nature du fertilisant phosphaté sur la nutrition des cultures en éléments autre que le phosphore.

CONCLUSION GENERALE.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

ANNEXES.

INDEX.

- C : Sol calcaire.
- S : Sol non calcaire.
- PN : Phosphate naturel.
- PG : Phosphogypse.
- RD : Refus dépoussiérés.
- TSP : Triple super phosphate.
- NG : Mélange en quantité égale de phosphate naturel et de phosphogypse.
- C.T : Sol calcaire témoin.
- C.PN : Sol calcaire fertilisé en phosphate naturel.
- C.PG : Sol calcaire fertilisé en phosphogypse.
- C.TSP : Sol calcaire fertilisé en triple super phosphate.
- C.NG ou C.(PN+PG) : Sol calcaire fertilisé en un mélange à quantité égale de phosphate naturel et de phosphogypse.
- S.T : Sol non calcaire témoin.
- S.PN : Sol non calcaire fertilisé en phosphate naturel.
- S.PG : Sol non calcaire fertilisé en phosphogypse.
- S.TSP : Sol non calcaire fertilisé en triple super phosphate.
- S.NG ou S.(PN+PG) : Sol non calcaire fertilisé en un mélange à quantité égale de phosphate naturel et de phosphogypse.

INTRODUCTION GENERALE .

Pour subvenir aux différents besoins alimentaires, sans cesse croissants, l'Homme est amené à intervenir à deux niveaux, à savoir : le sol et le végétal.

Certes, l'amélioration et la sélection des caractères agrobiologiques permettent l'obtention de cultures plus performantes, mais l'utilisation rationnelle des sols et l'augmentation de leur fertilité constituent aussi un élément primordial. En effet, la fertilisation est un élément essentiel dans l'amélioration des propriétés physico-chimiques des sols et dans la nutrition minérale des végétaux. De même qu'elle permet une augmentation des rendements agricoles.

L'Algérie a d'énormes ressources , cependant la majorité des sols sont calcaires et présentent un pH élevé entraînant une insolubilisation du phosphore et par conséquent son indisponibilité vis à vis du végétal.

La fertilisation phosphatée permettrait alors non seulement de palier à la carence en phosphore des sols algériens, mais apporterait aussi d'autres éléments, souvent absents dans la composition minérale des engrais chimiques (HALFAOUI, 1988). Cet apport de fertilisants phosphatés permet de même une augmentation de la productivité de divers sols, tels que les sols salés (DAUD, 1988), les sols acides (AMAR, 1988) et les sols lourds (HALFAOUI, 1988). Selon cet auteur, les sols lourds sont très répandus en Algérie et ont en commun les mêmes difficultés de mise en valeur.

Il faut noter que les sols sodiques sont caractérisés par une grande imperméabilité due surtout au taux élevé de sodium échangeable et que la fertilisation phosphatée peut être envisagée pour leur mise en valeur. Ce type de fertilisant apportant des quantités appréciables de calcium qui remplacent les ions Na^+ sur le complexe absorbant favorise la floculation des argiles. Ainsi la structure de ces sols se trouve améliorée et permet une augmentation des productions végétales.

En Algérie, la situation économique et le poids de la dette extérieure ont conduit à la limitation des importations de nombreux produits et matières premières, entre autres les produits fertilisants. A cet effet, et pour faire face à ce déficit en engrais phosphatés, il est souhaitable d'oeuvrer pour la mobilisation des différentes ressources naturelles et leur valorisation. Notons que les phosphates naturels algériens sont intéressants à plus d'un titre, tels que ceux de Djebel Onk, qui contiennent jusqu'à 20% de P_2O_5 , coûtant 10 fois moins chers que le TSP importé et sont payables en Dinars. Cependant ces phosphates naturels présentent l'inconvénient d'être peu solubles.

Une substitution des engrais tels que le TSP, et NPK par les phosphates naturels peut constituer un moyen efficace et peu coûteux dans la mise en valeur des sols algériens. A cet effet, notre travail consiste à une contribution au programme de valorisation des phosphates d'origine minière. Lors de l'extraction des phosphates naturels de djebel Onk il y'a des rejets de phosphate naturels tels que les refus dépoussiérés et le phosphogypse .

Ces sous produits méritent l'attention : les premiers renferment des teneurs appréciables en éléments nutritifs, en l'occurrence du phosphore, les seconds sont appréciés pour leur teneur en phosphore assimilable et leur acidité très forte.

L'utilisation de mélanges de phosphate naturel et de phosphogypse pourrait augmenter la solubilité du phosphore, ce qui améliorerait la fertilité des sols particulièrement les sols sodiques.

Dans le travail qui suit, nous nous proposons d'étudier expérimentalement l'influence des caractéristiques physico-chimiques (pH) et chimiques (teneur en phosphore) du phosphogypse sur la solubilité du phosphore et l'efficacité des phosphates naturels dans la nutrition minérale des végétaux cultivés.

L'expérimentation porte dans un premier temps sur la substitution des engrais chimiques par des mélanges de phosphates naturels et rejets phosphatés (refus dépoussiérés et phosphogypse) ; ceci pour comparer les éventuels effets des différentes doses de mélanges sur la solubilité du phosphore et la mise en évidence des quantités adéquates à apporter.

La seconde étape de ce travail porte sur le dosage des différents éléments minéraux (N, P, K, Ca, Mn, Mg, Zn, Na et Cu) dans les tissus végétaux et ce pour mettre en évidence l'influence des diverses sources de phosphore sur la nutrition minérale des plantes cultivées à savoir l'orge et la vesce.

PREMIERE PARTIE:

DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE I : - IMPORTANCE DE L'ELEMENT PHOSPHORE.

Le phosphore est un élément majeur, c'est l'un des 11 éléments de la composition élémentaire des êtres vivants. Ce sont, en fait les ions phosphatés qui ont une importance fondamentale dans les activités physiologiques.

I.1- Rôle du phosphore dans l'activité physiologique :

- Les ions phosphatés sont des constituants des molécules dépositaires du patrimoine génétique et de son expression dans la synthèse des protéines ADN et ARN. Ces éléments doivent leur acidité aux charges négatives résiduelles de leurs radicaux phosphorylés d'où leur capacité de liaison avec des protéines basiques. Ces radicaux phosphorylés font aussi partie des phospholipides, importants constituants des membranes (MOYSE, 1982).

- Le phosphore est un constituant de l'ATP, distributeur universel de la bioénergétique.

- L'ATP intervient en tant que régulateur dans des réactions enzymatiques.

- L'ATP, l'ADP et l'AMP (adénosine triphosphate, diphosphate et monophosphate) interviennent dans de nombreuses réactions de synthèse et de dégradation et sont à la base de radicaux phosphorylés. Ceci met l'accent sur l'importance du phosphore vis à vis de la constitution du noyau cellulaire, de la lécithine, des nucléoprotéines etc..., de même que vis à vis des activités physiologiques des végétaux (respiration, photosynthèse) et de réactions métaboliques (transport d'ATP...).

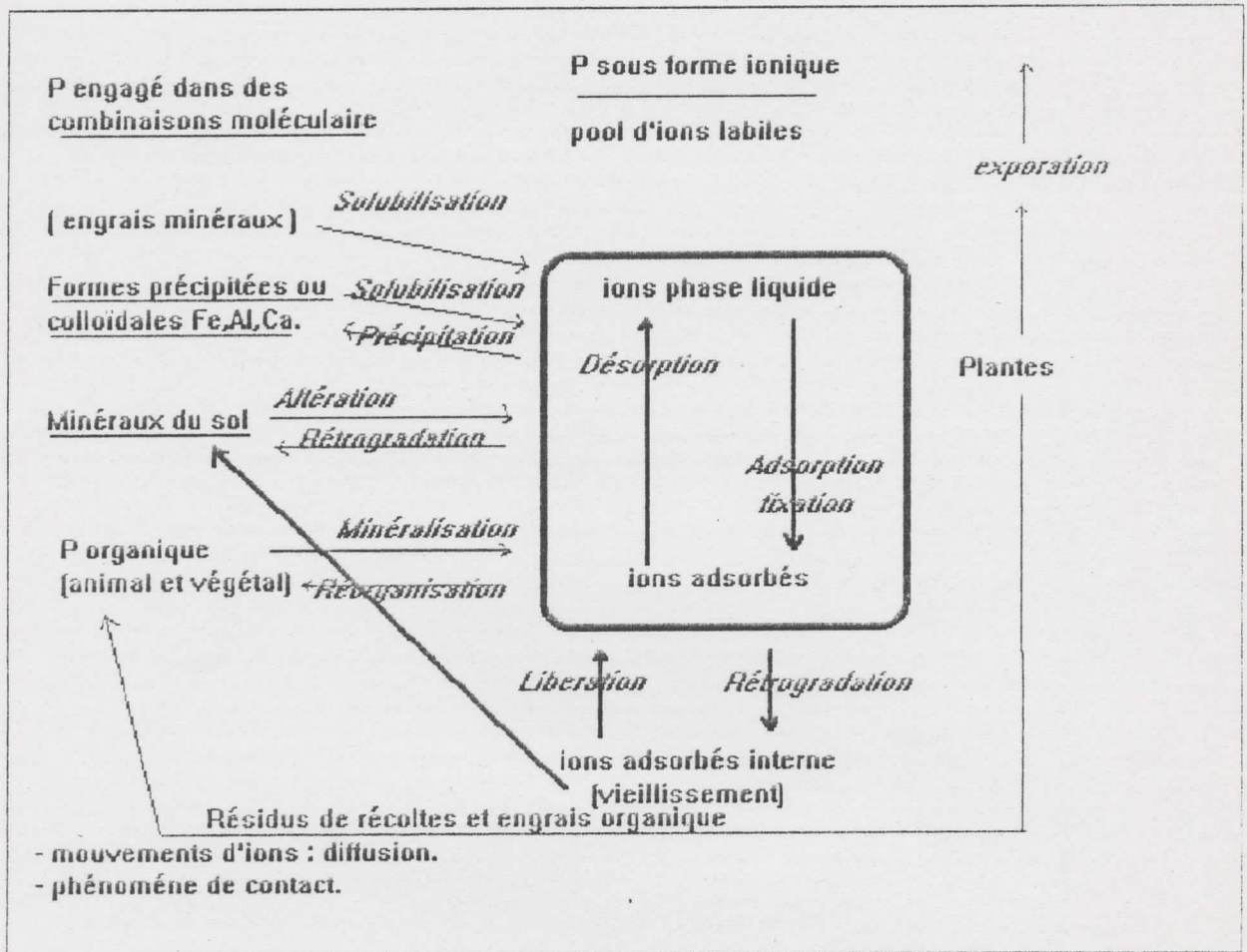


Figure 1.1 : Dynamique du phosphore dans le sol (Bosc, 1975)

I.2- Dynamique du phosphore dans le sol :

Comme le montre la figure 1.1 le phosphore se présente sous différentes formes dans le sol qui sont en relation avec des facteurs édaphiques et/ou climatiques. Ces variations de phases solide - liquide (rétention - précipitation - solubilité) sont souvent liées à celles du pH et au taux de phosphore (HARRISON et ADAMS, 1987).

I.2.1- Le phosphore soluble :

Il est représenté sous forme ionique . Cette forme est fonction du pH .

Il est vraisemblable que seul l'ion $H_2PO_4^-$ intervient dans la nutrition du végétal (DEMOLON, 1966). La figure I.2 donne la distribution des ions phosphoriques suivant le pH (GERVY, 1970).

% d'ions de chaque espèce

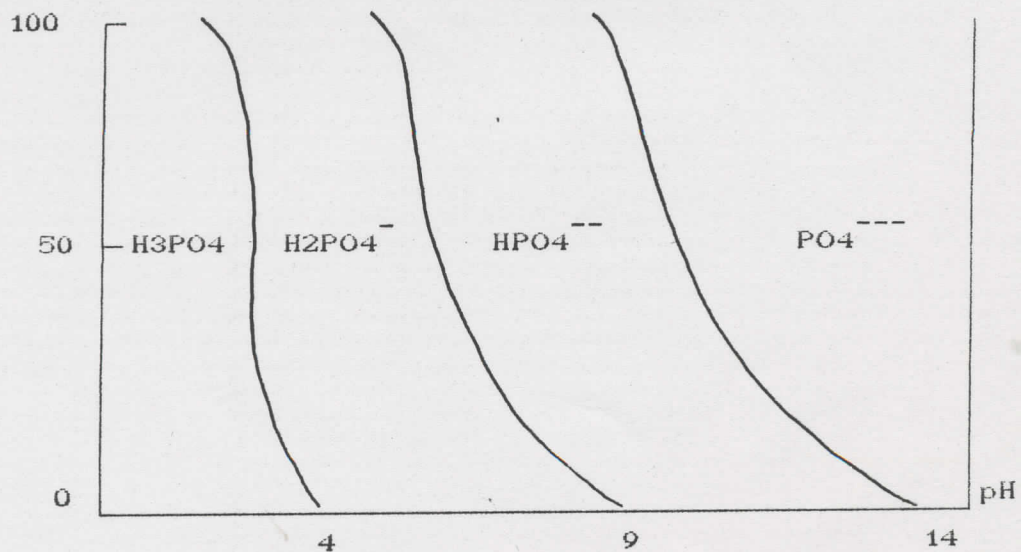


FIGURE I.2 : DISTRIBUTION DES DIFFERENTS IONS PHOSPHORIQUES SELON LE pH (GERVY, 1970).

Par contre dans la solution du sol la concentration en phosphore est diminuée, probablement à cause du phosphore lié à des composés métalliques (PAGEL et *al.*, 1985).

I.2.2 - Le phosphore échangeable :

Cette forme intéresse les ions phosphatés. Le phosphore échangeable est adsorbé à la surface des colloïdes du sol par les ions Ca^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} . Cette adsorption se fait sur les argiles, soit sur du calcaire fin, soit sur des oxydes hydratés de fer et d'aluminium.

Les formes soluble et échangeable constituent la réserve de phosphore assimilable dans l'immédiat pour le végétal. Ce phosphore assimilable est contrôlé par différents facteurs de sol tels que le phosphore labile et le pouvoir tampon (HOLFORD, 1980).

Cet auteur précise que la quantité de phosphore assimilable est une fonction directe de la quantité de phosphore labile, mais qu'au contraire constitue une fonction négative du pouvoir tampon.

I.2.3 : Le phosphore peu ou pas soluble :

La précipitation et la cristallisation provoquent le passage de la forme soluble à la forme insoluble. Cette dernière est un obstacle très important dans la nutrition phosphatée, notamment en sol calcaire.

I.2.4 : Le phosphore organique :

Cette forme représente 20 à 60 % du phosphore total. Le phosphore organique est composé de complexes organo-métalliques (90%), le reste comprend des composés typiquement organiques (lécithine, phytine, phospholipide, etc...). Il est accumulé dans le sol sous forme labile.

Lors d'apport d'engrais phosphatés, la plus grande partie est convertie pour être adsorbée et les formes minérales du phosphore inorganique sont associées au fer et à l'aluminium (SAMPLE et *al.*, 1980; WILLIAMS et *al.*, 1980). Le transport du phosphore organique est contrôlé par des réactions de sorption, de désorption et d'hydrolyse.

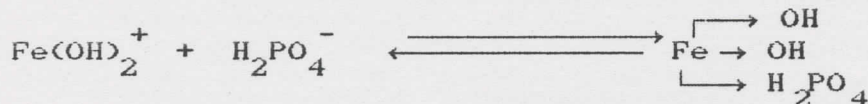
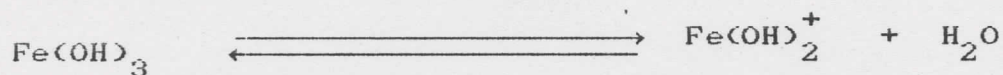
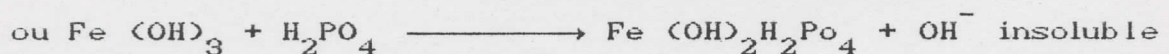
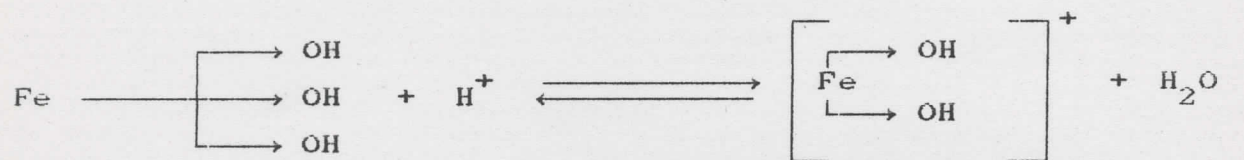
I.3: Cinétique des réactions de solubilisation, d'adsorption, et de sorption :

L'étude cinétique de l'effet du citrate d'ammonium sur la solubilité de l'orthophosphate dans un sol acide montre qu'un temps compris entre 1 et 8 heures affecte la concentration initiale du citrate, mais pour une période variant entre 8 et 27 heures, la solubilité de l'orthophosphate diminue à des niveaux constants (TRAINA et *al.*, 1987).

La cinétique des différentes réactions est modélisée selon un système linéaire instantané ou non linéaire instantané (CASTRO et ROLSTRON, 1977; MANSELL et *al.*, 1977; RAO et DAVIDSON, 1979; HOLFORD, 1980).

De même, CHIEN et al. (1980) ont modélisé la cinétique de dissolution de roches phosphatées par l'équation d'ELOVICH et l'équation d'ELOVICH modifiée. Celles ci ont permis de voir que le phosphore dissout devient mobile à travers la solution jusqu'aux racines du végétal où il est absorbé. En conclusion, la dynamique du phosphore est différente selon l'acidité du sol.

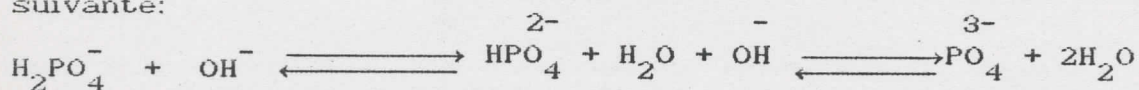
En sol acide les hydroxydes de fer et d'aluminium se comportent comme des colloïdes électropositifs pouvant alors fixer les anions phosphoriques (BLANCHET et al., 1971) selon le processus suivant:



Le phosphore lié à l'aluminium et le fer diminue avec l'augmentation du calcaire, formant ainsi des hydroxydes insolubles.

Selon GROS (1979) le composé formé est difficile à dissocier, mais pour un pH proche de la neutralité, la libération des ions phosphoriques devient facile. Par contre, FIXEN et LUDWICK (1982a) affirment que la solubilité du phosphate est maximale pour un pH de 5,8.

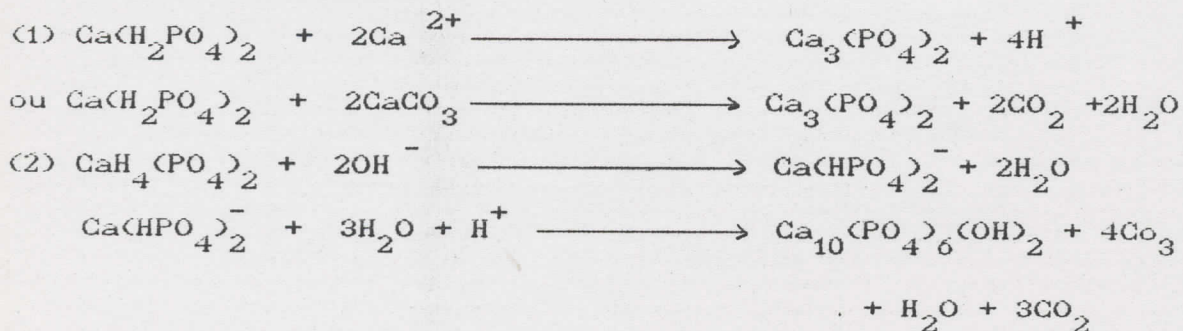
Par ailleurs, GROS (1979) rapporte qu'en sol basique l'ion H_2PO_4^- en présence de OH^- donne la réaction suivante:



En sol calcaire une réaction s'établit entre le phosphore et le calcaire résultant des formes Ca-P de lente solubilité (SHARPLEY et al., 1989). Cependant la présence d'oxydes de fer peut modifier le comportement du phosphore dans ces sols (RYAN et al., 1985b).

L'alimentation phosphatée du végétal peut être favorisée par l'acidification de la rhizosphère qui, elle, solubilise des phosphates peu solubles.

Quand on ajoute au sol des engrais phosphatés, le phosphore réagit avec le calcium libre ou combiné selon les réactions suivantes :



L'hydroxyapatite $\left[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2 \right]$ n'est pas soluble en solution basique.

Le déplacement des équilibres sous l'influence d'ions H^+ facilitant la solubilisation des phosphates; est schématisée par la figure I.3. Cette solubilisation, s'obtient en traitant les phosphates tricalciques naturels par l'acide sulfurique d'où un mélange de phosphate monocalcique et de sulfate de calcium.

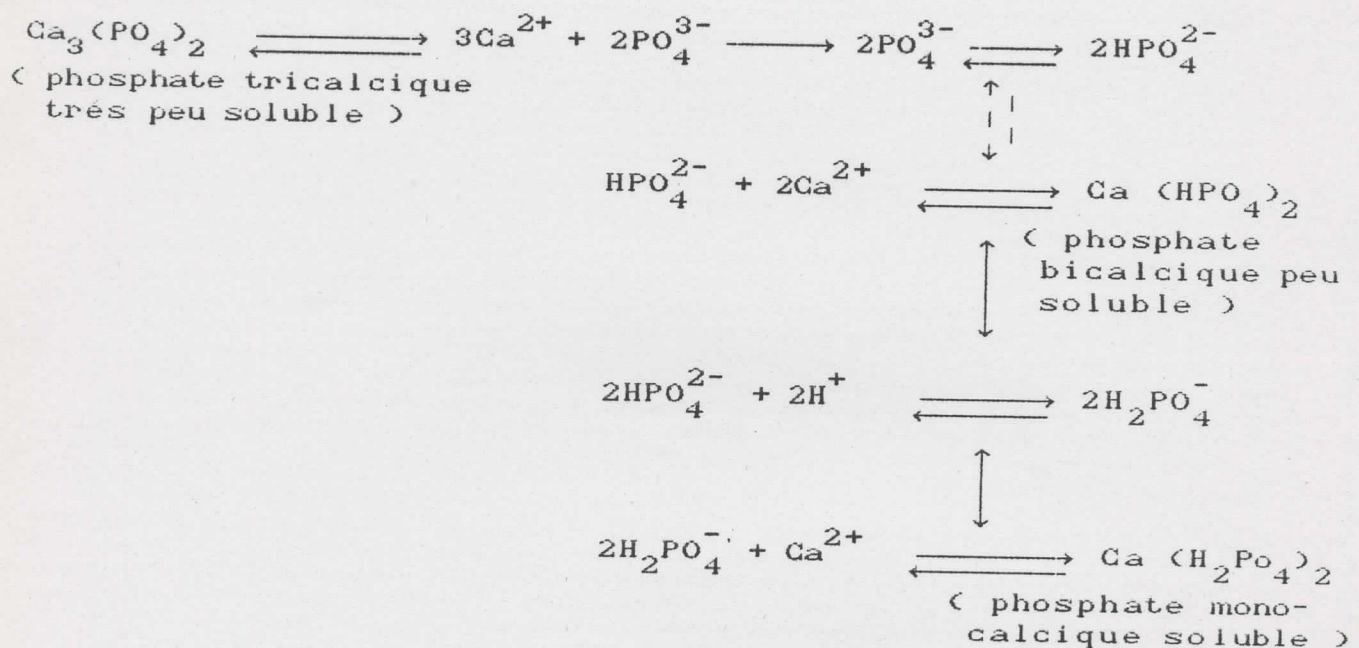


FIGURE I.3: EQUILIBRES INTERESSANT LA TRANSFORMATION DES PHOSPHATES (HELLER, 1968).

Le mécanisme d'adsorption - désorption se caractérise par un mouvement des phosphates qui s'effectue selon une adsorption d'abord rapide puis celle-ci tend à être ralentie avec le temps (BOWMAN et COLE, 1978; COX et *al.*, 1981; JONES et *al.*, 1984).

Les mécanismes de sorption sont gérés par plusieurs paramètres, parmi lesquels, nous citerons la micro-structure des agrégats et les oxydes de fer pour les sols méditerranéens (MANSELL et *al.*, 1985 ; TORRENT, 1986).

En effet, de nombreuses formes de fer sont corrélées avec la sorption du phosphore (KUO et LOTSE, 1974; KHALID et *al.*, 1977; SAH et MIKKELSEN, 1986a; GHANEM et MIKKELSEN, 1988). Telles que les fractions amorphes FeA et les fractions amorphes FeB toutes deux extraites par l'oxalate d'ammonium à pH 6 et à pH 3 respectivement (SAH et *al.*, 1989). De même, l'inondation des sols durant deux jours, même sans ajout de matière organique, augmente la sorption du phosphore de 10 à 70% , celle ci est même plus importante si l'inondation s'accompagne d'un apport de matière organique (SAH et MIKKELSEN, 1989).

Toutefois, en conditions aérobiques, l'ajout de matière organique permet une diminution de sorption du phosphore (ABBOT et TUCKER, 1973; SINGH et JONES, 1976; MEEK et *al.*, 1979) ainsi qu'une augmentation de désorption du phosphore (LIBOIS, 1966; SINGH et JONES, 1976; KUO, 1990).

Dans les sols calcaires, les caractéristiques de sorption ne peuvent être reliées avec le calcaire total car la réactivité du calcaire dépend de la surface spécifique qui, elle, est en relation avec la distribution de la taille des particules de carbonate plus qu'avec le calcaire chimiquement déterminé (HOLFORD et MATTINGLY, 1975a).

Pour une large gamme de sols variant dans leur teneur en CaCO_3 (0.8 à 24.2%), les capacités d'adsorption, basées sur l'équation de LANGMUIR, sont fortement associées avec la dithionite de fer soluble (HOLFORD et MATTINGLY, 1975b). Ces mêmes auteurs rapportent que le fer peut exister sous forme d'impuretés dans le calcaire et contribue alors à la sorption du phosphore.

Le phosphore sorbé peut entrer en association chimique avec le calcium provoquant ainsi une rétention importante de phosphore dans les sols acides contenant du calcium échangeable (SMILLIE et al., 1987). A long terme la sorption est affectée par le contenu de calcaire, et les oxydes semblent y contribuer (SOLIS et TORRENT, 1989).

Pour tous les sols, le phosphore adsorbé augmente de façon linéaire avec l'ajout du phosphore (KOVAR et BARBER, 1988).

Cependant la diminution de la capacité d'adsorption est affectée quand le rapport diamètre -épaisseur de la particule augmente (BARRON et al., 1988).

Au contraire, la sorption du phosphore et le pouvoir tampon augmentent avec l'augmentation de l'extractif d'aluminium et diminuent avec l'augmentation de la saturation de sodium ou la concentration de sodium dans la solution du sol.

Le pouvoir tampon, le contenu argileux, la capacité de sorption du phosphore ou encore la surface de saturation de la fraction de phosphore sont des paramètres en relation avec la concentration du phosphore dans le sol (KUO, 1990).

Le phosphore utilisé par le végétal est influencé par la quantité de phosphore ajouté et la sorption du phosphore (ERNANI et BARBER, 1990). Des études ont montré qu'il y'a un équilibre entre le phosphore en solution et le phosphore adsorbé après 42 jours (IBRAHIM et PRATT, 1982) ou 50 à 200 jours (MUNNS et FOX, 1976).

1.4 : Symptômes de carence et de toxicité en phosphore :

L'excès de phosphore ne manifeste pas de toxicité vis à vis des végétaux mais peut provoquer des déséquilibres en ce qui concerne le rapport N/P_2O_5 et une insolubilisation du fer dans le sol (DIEHL, 1975).

La carence en phosphore affecte directement la physiologie des plantes, ainsi 20 jours après germination les effets d'un manque en phosphore se font sentir sur la photosynthèse (PHAM et al., 1981). La carence se manifeste par un ralentissement dans la croissance : Le végétal est plus élancé,

le pétiole s'allonge, les feuilles restent minces et se dressent et les nervures sont peu prononcées.

Si la carence est plus aigue, les feuilles jaunissent et se nécrosent avec un brunissement roux. Il est à signaler que la carence est plus ressentie en année sèche qu'en année humide (HALFAOUI, 1976).

Par ailleurs il est constaté aussi que la carence se rencontre surtout pour des végétaux se développant sur sol léger, pauvre en chaux et en acide phosphorique (BAEYENS, 1967).

I.5 : Apports d'engrais phosphatés :

Le phosphore est inégalement réparti à la surface du globe; beaucoup de sols naturellement pauvres en phosphore sont incapables de fournir aux végétaux les quantités nécessaires à l'obtention de rendements élevés (I.M.PHOS, 1977).

Afin de pallier à cette pauvreté , des apports d'engrais phosphatés sont réalisés.

Cependant, pour quantifier les doses d'engrais, il faut, en premier lieu, déterminer la richesse du sol en éléments nutritifs, comme l'indique le tableau I.1.

TABEAU I.1 :- QUALITE DES SOLS EN FONCTION DE LEUR RICHESSE EN PHOSPHORE EXTRAIT SELON LA METHODE OLSEN (DUPUY,1972).

qualité des sols	P(mg/ kg de terre)
très pauvre à pauvre	inférieur à 20
moyennement riche, riche à très riche	supérieur à 20

Un bon sol agricole doit renfermer 0.75% de P₂₀₅ assimilable quand le sol contient plus de 10% de calcaire et 0.60% si la teneur en calcaire est moindre.

A cause de la faible mobilité du phosphore dans le sol, on préconise de ramener les engrais phosphatés en fumure de fond. DUTIL (1976) considère que la migration du phosphore est strictement d'ordre biologique. Notons que la fumure phosphatée perd 50% de son efficacité en un an et que les fortes valeurs de CEC et de fer libre diminuent l'assimilabilité du phosphore.

Afin de diminuer les risques de rétrogradation et favoriser l'absorption du phosphore, il convient de faire des amendements organiques en même temps que les engrais phosphatés.

Les légumineuses, extracteurs puissants du phosphore, sont recommandées comme engrais vert, elles restituent le phosphore progressivement par minéralisation lente (DUCHAUFOUR, 1970).

I.6 : Relations entre phosphore et autres éléments :

Le phosphore présente des relations de synergie avec l'azote, avec le potassium et avec le magnésium et d'antagonisme entre potassium et soufre, zinc, cuivre ou fer. On pense que cette relation est due à une trop forte concentration en acide phosphorique (RACZ et *al.*, 1974 cité par ALI-HAIMOUD, 1983). Celle ci ne doit pas dépasser 1.5mg/l et être en dessous de 0.5mg/l (DIEHL,1975).

La disponibilité du phosphore dépend du pouvoir fixateur du sol, lui même lié à la nature et à la finesse des constituants du sol.

Le phosphore, en tant que deuxième élément majeur, joue un rôle considérable dans la production végétale. Même, si les besoins des végétaux, pour cet élément, sont relativement faibles, des teneurs basses provoquent des perturbations physiologiques se manifestant par un ralentissement de la croissance. Par contre des phénomènes de déséquilibre nutritionnel sont observés chez les végétaux cultivés sur des sols très riches en phosphore. Ces teneurs trop élevées entraînent des déséquilibres du rapport N/P2O5 et/ou une insolubilisation du fer dans le sol.

CHAPITRE II - UTILISATION DU PHOSPHORE DANS LA FERTILISATION.

II.1- Origine du phosphore :

En fait le phosphore représente seulement 0,1% de la croûte terrestre (DEMOLON, 1966). Il provient de différentes origines:

II.1.1- Origine ignée :

Celle ci constitue 35 à 37% de P₂O₅ (GERVY, 1970). Cette source de phosphore se rencontre dans les couches profondes des terrains très anciens; souvent on y trouve associée de la fluorure de calcium (SANFOURCHE, 1947). Le gisement le plus important d'origine ignée est celui de Kola (Russie).

II.1.2- Origine sédimentaire :

Les roches d'origine sédimentaires produisent 85% de la production mondiale des phosphates (BENCHAAR, 1987).

De nombreux auteurs pensent que cette origine est plutôt biologique c.a.d. que le phosphore proviendrait de microorganismes, d'animaux marins ou terrestres (DEMOLON et MARQUIS, 1961).

D'autres auteurs, par contre, rattacheraient l'origine sédimentaire des phosphates à une propriété chimique qui est la dissolution dans les océans et les précipitations brutales à la croisée de certains courants marins. Ces phosphates ont une solubilité intéressante quant à leur efficacité du point de vue agronomique (BOUDJEMAA, 1988).

II.1.3- Origines diverses :

a/ Les déjections d'oiseaux se combinent avec le calcium de la roche sous jacente pour former des phosphates. On trouve ce type de gisement sous climat humide tel qu'en Océanie, au Vietnam, à Madagascar etc....

b/ Certains minéraux ferrugineux donnent avec des nodules phosphatés riches en sesquioxydes des composés phosphatés. exemple de tel gisement en Lorraine.

II.2- Réserves mondiales en phosphates naturels et consommation d'engrais phosphatés :

Les zones géographiques les plus productrices de phosphates sont l'Amérique du nord, l'Europe de l'est et l'Afrique du nord. Selon la FAO (1979), la production mondiale s'élève à 128 millions de tonnes (tableau II.1).

TABLEAU II.1:- PRODUCTION DES PHOSPHATES PAR ZONES GEOGRAPHIQUES
(en milliers de tonnes) d'après FAO (1979)

Zone géographique	Production (10 ⁶ T)	Producteur le plus important
Amérique du Nord	51	Mines de Caroline et surtout de Floride. Titre relativement bas (29-30% de P ₂ O ₅).
Europe de l'Est	25	Gisement de Kola, 38-39% de P ₂ O ₅ .
Afrique du Nord	25,3	Gisement le plus important au monde se trouvant au Maroc (31-32% de P ₂ O ₅).
Afrique Ouest et Sud	7,9	Sénégal (Taïba), Togo
Moyen Orient	6,8	Palestine, Jordanie, Egypte
Asie socialiste	6,05	
Océanie	3,6	
Amérique latine	1,9	Brésil
Asie du Sud	0,5	
Europe de l'Ouest	0,06	
Total mondial	128	

En Algérie la production de phosphates naturels est assurée principalement par le complexe de Djebel Onk. Ce dernier traite annuellement environ 03 millions de tonnes de tout venant, de cette quantité, seulement la moitié donne un produit marchand. Cette production de l'ordre d'un millier de tonnes, subit de légères fluctuations d'une année à une autre, comme l'indique le Tableau II.2.

TABLEAU II.2:- EVOLUTION DE LA PRODUCTION DES PHOSPHATES NATURELS
(dépoussiéré et calciné) EN ALGERIE DE 1984 à 1991.
(STOWASSER, 1991.)

Année	Production (milliers de tonnes)
1984	1000
1985	1207
1986	1203
1987	1073
1988	1332
1989	1223
1990	1128
1991	1090

Concernant, la consommation mondiale, celle-ci s'élève à 31,5 millions de tonnes plaçant ainsi, selon IGNAZI (1983), le phosphore en deuxième position après l'azote (52,2 millions de tonnes) et devant le potassium (24,2 millions de tonnes de K₂O).

En Algérie, la consommation annuelle moyenne est de l'ordre de 246.000 tonnes, avec de légères fluctuations d'une année à une autre. Il faut signaler aussi, que les phosphates dépoussiérés représentent la plus grande fraction consommée comme l'indique le tableau II.3.

TABEAU II.3: CONSOMMATION D'ENGRAIS PHOSPHATES (MATIERES PREMIERES) source: ASMIDAL.

Matièresières Année (T)	Phosphates dépoussiérés	Phosphates calcinés	Soufre
1974	252139	53679	56065
1975	241115	36276	52760
1976	240574	43876	42985
1977	282071	39988	78809
1978	307064	41751	77983
1979	194450	41636	53330
1980	189256	28395	19774
1981	102519	16291	00000
1982	224570	38336	55164
1983	245242	37166	54062
1984	332287	57388	86112

II.3- Valorisation des phosphates naturels :

Afin d'être utilisés comme engrais, les phosphates naturels subissent quelques traitements (figure II.1). Ils servent, en fait, de matière première pour la fabrication d'acide phosphorique et d'engrais phosphatés car ils sont très peu ou pas solubles; dans l'eau chargée en CO₂ à pH < 7 ils se dissolvent progressivement, par contre pour des pH > 7 la dissolution est quasiment nulle surtout pour les apatites (RYSER, 1986)

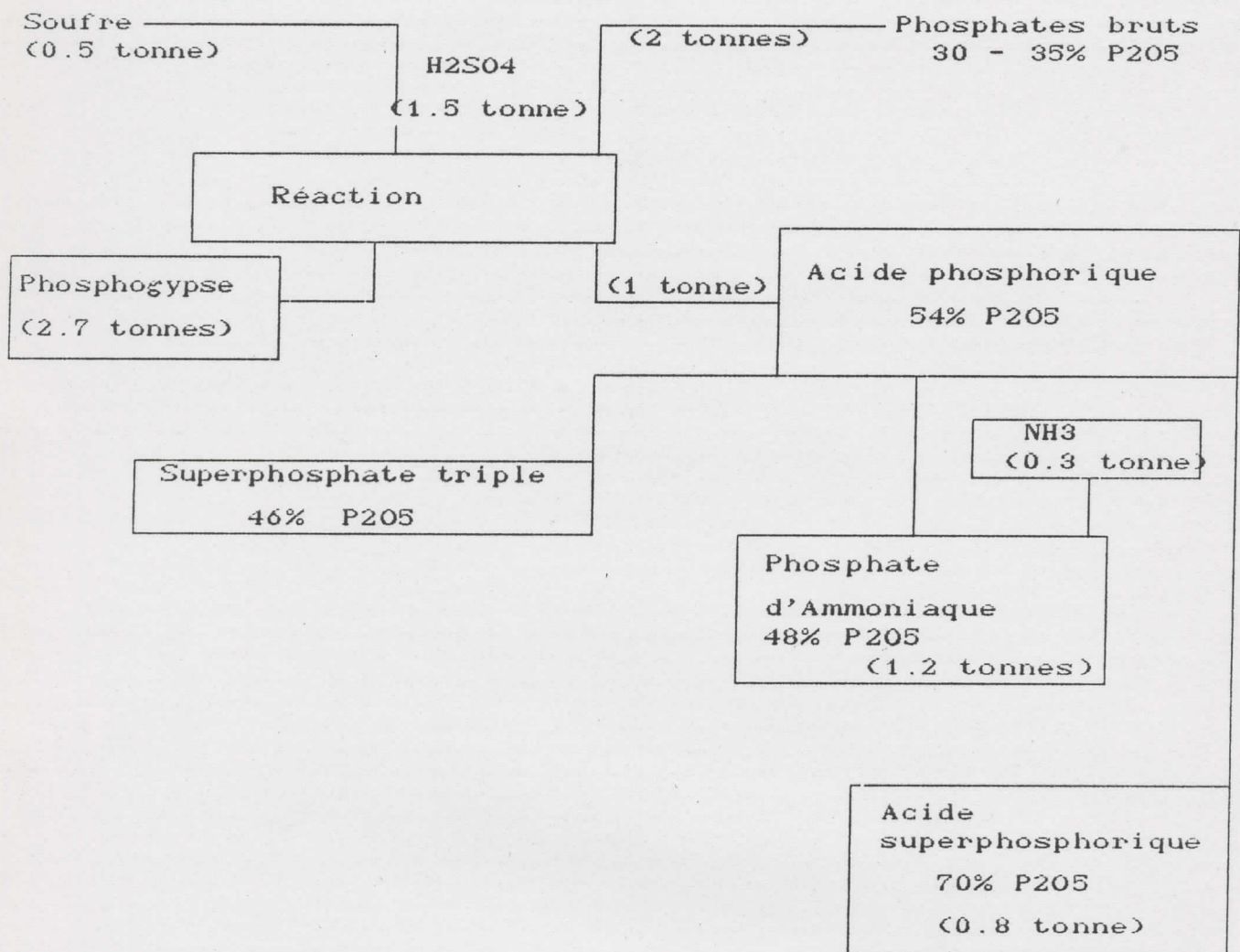


Figure II.1 : Aperçu sur la fabrication des engrais phosphatés.

En effet, la solubilité représente un facteur de premier ordre dans l'évaluation de l'efficacité des phosphates naturels. Celle-ci peut être estimée par des procédés chimiques utilisant des réactifs tels que l'acide citrique (2%), l'acide formique, le citrate d'ammonium, etc....

Toutefois, ces tests n'ont qu'une relation incertaine avec l'efficacité agronomique (LEYMONIE et WEBER, 1986)

car le rôle du sol est indéniable. En fait, l'expression d'une teneur en P_2O_5 dans les solvants (eau, acide citrique, etc...) représente la rapidité de l'action du phosphore de l'engrais apporté (ANDRE, 1988).

Le tableau II.4 montre que pour un même solvant la solubilité est plus élevée pour les phosphates d'USA, ensuite par ordre décroissant, viennent les phosphates de Palestine, de Tunisie, du Pérou, de Colombie et du Brésil. On note que l'acide formique offre une solubilité plus importante que le citrate d'ammonium et l'acide citrique.

D'une manière générale l'acide formique est le solvant le plus apte à solubiliser les phosphates; pour les autres solvants, leur action diffère selon l'origine du phosphate; ainsi pour les phosphates de Djebel Onk le citrate d'ammonium solubilise moins de phosphore que l'acide citrique, ce qui n'est pas le cas pour les phosphates des autres provenances (AMAR, 1988; TRUONG, 1988).

La solubilité absolue dans le citrate (ACS) est aussi utilisée, celle ci serait mieux corrélée avec la réponse des plantes. Cet indice ACS est défini comme étant le rapport du % de P_2O_5 soluble dans le citrate (AOAC) sur la teneur théorique P_2O_5 de l'apatite en question. CHIEN et HAMMOND (1978) rapportent que l'utilisation du citrate d'ammonium à pH 3 est un solvant efficace pour prévoir le potentiel agronomique des roches phosphatées.

TABLEAU II.4:-SOLUBILITE ET ORIGINE DES DIFFERENTES SOURCES
DE PHOSPHORE EXTRAIT PAR DIFFERENTES METHODES
(%ROCHES) (LEON et al ; 1981.)

origine du phosphore	citrate d' NH_4 neutre	acide citrique 2%	acide formique 2%
Caroline du Nord (USA)	6.7	6.7	8.5
Arad (PALESTINE)	5.9	5.6	10.4
Gafsa (TUNISIE)	5.6	5.7	10.0
Fasbayovar (PEROU)	5.4	5.0	7.6
Huila (COLOMBIE)	3.4	2.1	3.6
Patos de minas (BRESIL)	1.3	2.4	2.3

Les travaux de BOUDJEMAA (1988) font ressortir que tous les phosphates naturels ayant des indices de solubilité absolue (ACS) dans les citrates supérieurs à 14% ont une forte probabilité d'être aussi efficaces que les phosphates naturels solubles.

Ce même auteur rapporte que les phosphates naturels qui libèrent 3.4% de phosphore soluble dans le citrate d'ammonium neutre ont une solubilité élevée et peuvent donc être appliqués directement. En fait, il semble que selon la nature du sol c'est tel ou tel acide organique qui a un effet sur la solubilité.

Ainsi, l'acide oxalique aurait plus d'effet sur la solubilité du phosphore que l'acide citrique ou fumarique quand le sol est calcaire; au contraire, en sol non calcaire

c'est l'acide citrique qui a le plus d'effet sur la solubilité.

Les phosphates solubles dans les acides ne subissent pas de rétrogradation dans les sols à pH < 6.5 par contre, plus les phosphates solubles à l'eau sont en quantité élevée, plus la quantité d'ions phosphates rétrogradés est élevée. A ce propos HOOKER et al. (1980) signalent que le phosphore soluble dans l'eau est très rapidement immobilisé dans les sols calcaires, à cause d'une substitution des formes Ca-P qui sont de solubilité lente. La température a aussi un effet négatif sur la diminution du phosphore soluble dans l'eau pour les sols traités avec du superconcentré (BARROW et SHAW, 1975).

Pour des phosphates de même origine, la solubilité varie selon le solvant et le type d'attaque réalisée. A titre d'exemple, les phosphates de Djebel Onk montrent une meilleure solubilité dans l'acide formique (tableau II.5).

Nous remarquons aussi que, pour un même solvant, la solubilité est faible pour le phosphate brut, par contre, elle est plus élevée pour les attaques mixtes que pour les attaques complexes.

Par ailleurs, nous constatons que la solubilité du phosphate brut est élevée pour l'acide formique à 2% et que les phosphates ont pratiquement la même solubilité quelque soit les attaques subies.

En fait ni la solubilité dans l'eau ni celle dans le citrate ne peuvent être utilisées pour prévoir l'efficacité agronomique des mélanges TSP-roches phosphatées à différentes teneurs en phosphore (CHIEN et al.; 1987).

TABLEAU II.5:- SOLUBILISATION PARTIELLE, TENEUR EN PHOSPHORE TOTAL ET SOLUBILITE DANS DIVERS REACTIFS DES PHOSPHATES DE DJEBEL ONK EN ALGERIE (TRUONG, 1988).

Phosphate	Solubilité en % du P ₂ O ₅ total				
	P ₂ O ₅ tot.	H ₂ O	Citrate neutre	Acide 2% citrique	Acide 2% formique
Phosphate brut	30.30	0.02	18.60	40.00	71.70
A ₁ - attaque mixte (attaque sulfurique + phosphorique)	30.50	32.50	41.30	58.90	61.60
A ₂ - attaque mixte renforcée	32.20	58.10	61.20	79.30	79.10
A ₃ - attaque complexe (attaque sulfurique + sel d'ammonium)	29.30	30.00	39.40	57.70	66.90
A ₄ - attaque complexe renforcée	26.20	39.90	44.90	67.30	73.20

II.3.1: Les phosphates naturels en Algérie :

C'est au 19^{ème} siècle que le premier gisement de phosphates naturels est découvert mais ce n'est que beaucoup plus tard que sa mise en service fût exploitée.

Ce gisement se situe au Sud-Est du pays (Tebessa) a djebel Onk; il comprend différents gites dont le seul exploité actuellement est celui de Djemdjima (Bir El Atter). Ce dernier est d'une capacité de production de 500 millions de tonnes (HALITIM et al., 1986). Actuellement seulement 1,2 millions de tonnes/ année sont extraites.

Les phosphates naturels algériens sont tendres, ils pourraient donc être utilisés directement en agriculture, mais leur efficacité peut être augmentée quand ils sont broyés

(TRUONG, 1985). Actuellement, l'exploitation des phosphates naturels est assurée par FERPHOS.

II.3.2: Traitements subis par les phosphates naturels :

Afin de favoriser l'efficacité en agriculture, le minerais brut est d'abord concassé puis broyé et enfin criblé.

Ce criblage permet l'élimination des éléments durs.

La deuxième étape de fabrication se fait selon deux voies:

a/ voie humide qui présente différentes étapes :

- Un débourbage qui consiste à éliminer les parties siliceuses pouvant être difficiles à détruire par la suite.

- Une calcination qui permet de valoriser les phosphates à gangues carbonatés. Les carbonates de chaux et la magnésie sont séparés; les matières volatiles sont alors éliminées. Durant cette phase on a d'abord un préchauffage puis une calcination proprement dite et enfin un refroidissement.

- Un lavage : La chaux formée lors de la calcination ainsi que les sels alcalins et la magnésie sont tout trois éliminés durant ce lavage.

- Un séchage qui permet la réduction de l'humidité de 12 à 0,2% .

b/ Voie sèche (Depoussiérage): Le minerai criblé est séché dans un four sécheur puis subit différentes opérations:

- Un criblage primaire à la maille de tamis de 2mm où tout ce qui est supérieur ou égal à 2mm est éliminé.

- Un broyage dans un broyeur à percussion qui a

pour effet d'éliminer la maille argileuse enveloppant le minerai.

- Le produit broyé est passé dans des sélecteurs pneumatiques éliminant ainsi les particules dont le diamètre est inférieur à 80μ .

- l'étape finale consiste à un criblage secondaire. Le passant criblé à la maille de 800μ , constitue le concentré dépoussiéré.

Signalons que l'atelier calcination sert à la production de l'engrais superphosphate alors que l'atelier dépoussiérage sert à la production d'acide phosphorique (Fig. II.2).

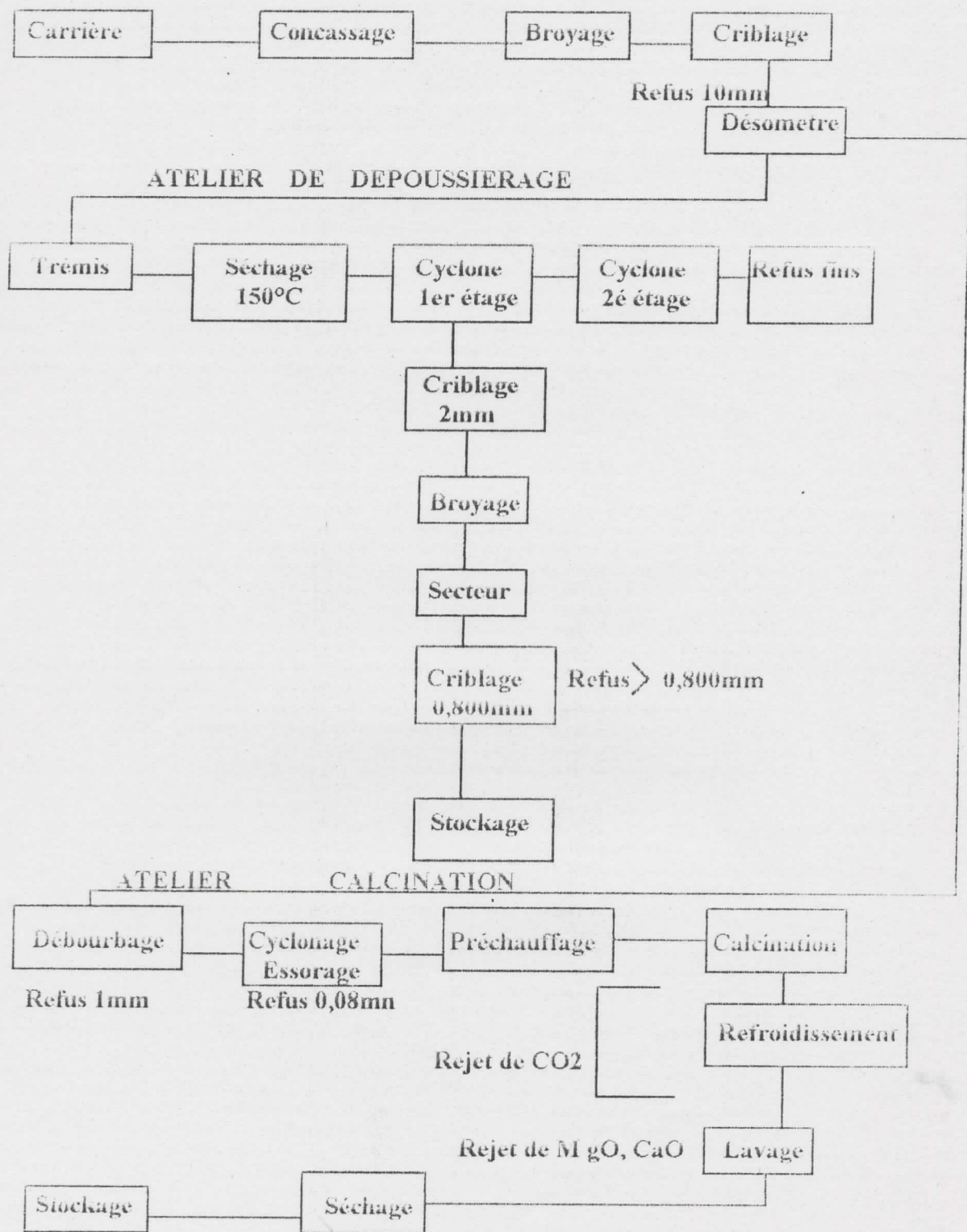


FIGURE II. 2 : LES DIFFERENTS PROCES DE MISE EN VALEUR DES PHOSPHATES NATURELS.

II.4 : Les rejets de phosphate comme autre source d'engrais phosphates :

Lors de la valorisation des phosphates naturels il y'a des rejets (refus) de phosphate, qui eux aussi, peuvent avoir un impact sur l'agriculture en tant que fertilisant phosphaté. Ces rejets renferment de l'oxyde de calcium (44%), de l'anhydride phosphorique (23%), de l'anhydride carbonique (14%), de la silice (5%) et du fluor (5%) (RAJU, 1988).

Il existe trois types de rejets phosphatés :

II.4.1 - Les rejets de criblage primaire (refus criblés):

Ils sont obtenus à la fin de la première étape mécanique, c.a.d après le concassage et le broyage. Le diamètre des rejets criblés varie entre 4mm et plus de 20mm.

II.4.2 - Les rejets de débourbage :

Les phosphates naturels algériens posent un problème à cause de leur richesse en magnésium car ce dernier est hydrophile et de ce fait forme une boue qui s'accumule dans les turbines des machines ne laissant plus passer les phosphates (KHELLAF, 1981). Le diamètre de ces rejets de débourbage est de l'ordre de 0.08mm à plus de 4mm.

II.4.3 - Les rejets de dépoussiérage :

Ils sont les plus utilisés à cause de la finesse de leur mouture. Enfin, comme l'indique le tableau II.6, la composition chimique ne montre aucune variation significative d'un type de rejet à un autre.

TABLEAU II.6 - COMPOSITION CHIMIQUE DES REJETS DE PHOSPHATE ALGERIENS (d'après E.N.FERPHOS, 1988)

Refus	REFUS			GLOBAL
	Criblage	Débouillage	Dépoussié- rage	
Analyses				
Perte au feu	3,15	3,45	3,85	2,63
Anhydride Phosphorique	22,31	22,01	24,18	22,91
Anhydride Carbonique (CO ₂)	13,60	14,00	12,00	13,60
Oxyde de calcium (CaO)	43,18	43,46	43,74	44,02
Oxyde de silicium (SiO ₂)	4,87	4,17	4,23	4,45
Oxyde de magné- sium (MgO)	5,44	5,24	4,64	4,64
Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃	0,56	0,50	0,52	0,52
Fluor	4,88	5,61	5,72	5,32

CHAPITRE III - FACTEURS INTERVENANT SUR L'ASSIMILABILITE DES PHOSPHATES NATURELS.

Pour augmenter leur efficacité, les phosphates naturels sont conditionnés selon de nombreux paramètres parmi lesquels nous citons :

III.1- Caractéristiques intrinsèques et origine :

La minéralogie, la cristallographie, la composition chimique et la solubilité dans les réactifs standards sont autant de facteurs qui affectent la solubilité du phosphore dans les minéraux phosphatés.

Les phosphates d'Algérie occupent la première place avant ceux de Tunisie et ceux de Tilemsi au Mali (TRUONG, 1985).

Le tableau III.1 fait apparaître que les phosphates algériens sont les plus solubles, notamment dans l'acide formique et ceux du Brésil sont les moins solubles surtout dans le citrate d'ammonium neutre. Pour les phosphates naturels tendres, la valeur agronomique sera fonction de l'importance de la fraction de phosphore soluble dans le réactif conventionnel acide formique 2%; le minimum légal ayant été fixé à 55% du phosphore soluble dans les acides minéraux. Notons toutefois que les phosphates naturels de Tunisie atteignent 75% de la teneur en anhydride phosphorique soluble dans les acides minéraux (ANDRE, 1988).

TABLEAU III.1:- SOLUBILITE DES DIFFERENTES SOURCES DE PHOSPHORE. (% de roche)

(LEON *et al* ; 1981, TRUONG ; 1988).

Origine du phosphore	Citrate d'ammonium	Acide citrique	Acide formique
ALGERIE	18.60	40.00	71.70
USA	06.70	06.70	08.50
PALESTINE	05.90	05.60	10.40
TUNISIE	05.60	05.70	10.00
PEROU	05.40	05.00	07.60
COLOMBIE	03.40	02.10	03.60
BRESIL	01.30	02.40	02.30

III.2- Finesse de la mouture :

Celle ci augmente la vitesse de mise en solution du P_2O_5 (KOUIDER, 1974) et améliore la surface de contact entre le phosphate et le sol. Pour une granulométrie supérieure à 0,5mm, l'effet de la finesse de mouture est presque nul, alors que pour une granulométrie entre 0,5 et 0,1mm l'efficacité est augmentée de 17% ; une finesse de mouture en dessous de 0,1mm est déconseillée, car, à cette finesse, la surface géométrique des particules ne représente que 5% de la surface totale à cause des structures poreuses ouvertes des phosphates. A titre d'exemple

nous avons une exportation en phosphore de 8,80 ppm de P pour une finesse de grains de 0,5mm contre 10,26ppm de P pour une finesse de 1mm (TRUONG, 1988).

Cependant ce facteur semble être important pour les réponses des cultures à court terme mais non pour le degré de solubilité à long terme des phosphates naturels (BOUDJEMAA, 1988) En terme de législation, la finesse imposée est fixée à un passage d'au moins 90% au tamis à ouverture de maille de 63 μ .

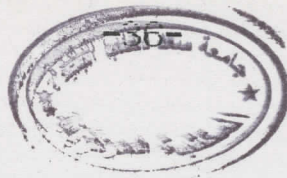
III.3- Facteur sol :

C'est un facteur très important qui intervient selon différentes caractéristiques du sol parmi lesquelles figurent:

- Le type de sol : Pour un sol acide le coefficient d'utilisation du phosphore par le végétal est plus élevé que pour un sol calcaire (KOUIDER, 1974).

- La texture du sol : En sol sableux, le complexe adsorbant étant très faible, le phosphore est rapidement déplacé et par conséquent non efficace à cause d'une forte lixivation. Il existe une relation très étroite entre teneur en argile et fixation de phosphore (VELAYUTHAM, 1980), plus précisément encore ceci dépend de la nature minéralogique de l'argile (DEMOLON, 1968).

- La structure du sol : Celle ci influe sur l'implantation des racines. Le phosphore ne migrant que très peu, les racines doivent aller bien loin pour pouvoir le puiser. Il faut donc que le sol, soit favorable au cheminement des racines.



- L'humidité du sol : Quand celle ci est de 25% de la capacité de rétention, l'efficacité est maximale pour les phosphates solubles. Elle ne varie pas beaucoup pour 50% de la capacité de rétention; alors que pour les phosphates peu solubles l'efficacité est augmentée quand l'humidité passe de 25 à 50% de la capacité de rétention (ONUDI, 1985).

Une humidité est toujours nécessaire pour l'absorption du phosphore par les plantes, une certaine dessiccation diminue parfois la solubilité des phosphates d'une manière plus ou moins irréversible.

- Le pH du sol : C'est un facteur très important car c'est lui qui régit la disponibilité des éléments nutritifs. En général, le pH du sol autour de la neutralité (6,5 - 7,5) est celui qui favorise la forme assimilable des éléments nutritifs. En sol acide le phosphate naturel est plus efficace que le triple superphosphate (AWAN et al., 1971). Le phosphate naturel moulu n'est d'ailleurs efficace qu'en sol acide ($pH < 6$) notamment en ce qui concerne les phosphates apatiques (ONUDI, 1985; RYSER, 1986).

Cependant les phosphates alumineux sont plus efficaces en sols neutres ou calcaires. L'efficacité des phosphates naturels en sols acides est confirmée par TRUONG (1985).

- La matière organique du sol : Celle ci ne semble avoir aucun effet sur la solubilisation des rejets de phosphate (BENCHAAAR, 1987). Elle a cependant une action indirecte; en effet, la minéralisation est d'autant plus rapide que la température édaphique est élevée ce qui a pour effet de

favoriser la libération du phosphore contenu dans la matière organique (PARAPUS, 1960; cité par KHELLAF, 1981). La formation de complexe humophosphaté protège les ions phosphoriques d'une fixation plus ou moins irréversible en les maintenant sous une forme récupérable par le végétal (TARDIEU-ROCHE, 1966).

- La microflore : Dans le sol, la fermentation des substances hydrocarbonnées, régis par la microflore, permet d'attaquer certains phosphates qui libèrent ainsi l'acide phosphorique. L'efficacité des acides organiques provenant de l'activité microbienne dépend de l'acidité du sol; celle ci doit être très basse, selon des valeurs non atteintes par les sols, pour que l'efficacité soit bonne (BENCHAAR, 1987).

- L'action des ions : Il existe des anions inactifs (Cl^- , SO_4^{2-} ...) qui favorisent la fixation des ions PO_4^{3-} , par contre, les anions actifs diminuent le taux de fixation. Les ions Cu, Fe et Zn interviennent aussi dans la fixation des ions PO_4^{3-} (DEMOLON, 1968).

- L'action des sesquioxydes : Dans un sol riche en Fe_2O_3 ou Al_2O_3 , la rétention du phosphore est telle que sa disponibilité est très faible (RYSER, 1986). Par contre l'absence totale de fer ou d'aluminium, en sol acide, défavorise la fixation des ions PO_4^{3-} (DEMOLON, 1968). Sur ce même sol acide les sesquioxydes se combinent avec les anions H_2PO_4^- formant des composés insolubles.

- L'action du calcaire : Selon sa texture, sa dureté etc..., le calcaire va libérer des ions Ca^{2+} (DUTIL, 1976). Ces derniers vont se combiner aux ions PO_4 dissous pour

donner des phosphates: solubles monocalciques et bicalciques, ainsi que les octocalciques, tricalciques et apatitiques; ces derniers étant insolubles.

Notons toutefois que les sols calcaires ont un pouvoir de retrogradation de l'ordre de 50% de la quantité d'acide phosphorique ajouté (GACHON, 1982).

III.4- Facteurs climatiques:

Il semble que le climat chaud soit plus favorable que le climat humide pour augmenter l'efficacité des phosphates naturels (ONUDI,1985). Par contre, CHIEN et al. (1980) affirment que le facteur température n'influe pas sur la dissolution des roches phosphatées.

III.5 - Le facteur végétation :

La réponse vis à vis des phosphates varie en fonction du type du végétal. Ainsi, les légumineuses semblent donner les meilleurs résultats (KHELLAF, 1981). Ceci semble lié au fait que les légumineuses, fixant l'azote de façon symbiotique, provoquent une baisse du pH de la rhyzosphère et peuvent alors s'alimenter de phosphate calcique peu soluble (DAOUD,1988). SANFOURCHE (1947) affirme que les racines des végétaux ont une action dans la solubilisation des phosphates insolubles.Ceci peut s'expliquer par le fait que les exudats racinaires des végétaux supérieurs peuvent être des composés organiques qui peuvent agir directement sur les phosphates calciques du sol pour les altérer et libérer le phosphore dans la

solution du sol (DAOUD,1988). Les myccorhizes, aussi, jouent un rôle de solubilisateur vis à vis du phosphore inassimilable (IGNAZI, 1982).

L'utilisation des phosphates naturels nécessite une connaissance parfaite des facteurs qui les contrôlent. En effet, leur comportement est étroitement lié à leurs caractéristiques propres d'une part; aux propriétés physico-chimiques et biologiques du sol, d'autre part, et dépend même de la nature du végétal.

CHAPITRE IV - ORIGINE ET UTILISATIONS POTENTIELLES DU PHOSPHOGYPSE.

IV.1- Origine :

Le phosphogypse en tant que sous produit de l'industrie phosphatée, constitue une source d'engrais. La production de 2 tonnes de phosphate naturel donne 2,7 tonnes de phosphogypse . En fait la quantité élaborée est fonction de la roche d'origine. Le phosphogypse renferme du sulfate de calcium anhydre (CaSO_4), hémihydraté ($\text{CaSO}_4,1/2\text{H}_2\text{O}$) ou dihydraté ($\text{CaSO}_4,2\text{H}_2\text{O}$); il est caractérisé par un pH très acide (2 - 3) La composition chimique du phosphogypse algérien est indiquée dans le tableau IV.1.

TABLEAU IV.1 - COMPOSITION CHIMIQUE DU PHOSPHOGYPSE ALGERIEN
(d'après ASMIDAL, 1984)

	Formule	%
Eau de cristallisation	H_2O	18,68
P_2O_5 soluble dans l'eau	P_2O_5	0,50
P_2O_5 syncristallisé	P_2O_5	0,52
P_2O_5 insoluble	P_2O_5	1,25
Acide Phosphorique	H_3PO_4	0,68
Phosphate tricalcique	$Ca_3(PO_4)_2$	1,81
Oxyde de magnésium	MgO	0,035
Oxyde de fer	Fe_2O_3	0,000
Oxyde d'aluminium	Al_2O_3	0,09
Sulfate de calcium	$CaSO_4$	79,22
Silice	SiO_2	0,78
Fluor	F	0,62
Pourcentage total du PG en P_2O_5		4,08

IV.2 Utilisation en agriculture:

Du point de vue agronomique son impact est important notamment sur sols salés et alcalins, lesquels voient leurs propriétés physico-chimiques améliorées (SIFAOUÏ, 1980; DAOUD, 1988).

Les sols sodiques, caractérisés par un taux élevé de sodium échangeable voient leur structure se dégrader peu à peu, leur pH augmenter et leurs argiles se disperser, ce qui les rend imperméables et impropres aux cultures.

L'apport de phosphogypse à de tels sols, va peu à peu déplacer le sodium et le remplacer sur le complexe adsorbant par le calcium. Les ions sodium sont alors lixiviés en profondeur par les eaux. D'autre part, le pH bas du phosphogypse, contribue à abaisser le pH des sols salés, ce qui va accroître la teneur en phosphore assimilable et augmenter par la même la disponibilité des éléments traces, particulièrement déficients en sols salés. L'effet positif du phosphogypse est aussi relaté par HALITIM et al.,(1986). sur les sols hydromorphes et argileux qui voient leur perméabilité, et leur porosité améliorées. Sur les sols carbonatés, l'apport de phosphogypse est intéressant car tout en abaissant le pH de ces sols, il favorise la disponibilité des éléments nutritifs.

De part sa richesse en soufre, le phosphogypse est intéressant à apporter sur sols pauvres en soufre. Enfin, le phosphogypse favorise l'efficacité des engrais chimiques et ce par l'amélioration des propriétés physiques des sols ; de même qu'il modifie favorablement le drainage et a un impact sur la dynamique des oligo-éléments.

Le phosphogypse, cependant, pose des problèmes vis à vis de l'environnement car lors de sa fabrication le fluor libéré est rejeté à la mer, ce qui peut, à la longue affecter la vie de la faune et de la flore marines.

D'autre part, la teneur en fluor du phosphogypse pose, selon certains auteurs des problèmes vis à vis de la nutrition du végétal (HALITIM et *al.*, 1986); par contre d'autres auteurs (MEHTA et YADAV, 1977 cités par BENAMAR, 1991) estiment que le fluor est sous forme de fluorine insoluble et par conséquent ne peut avoir que très peu d'effet sur les plantes car cet élément reste dans le sol comme matière inerte. Il semble que le fluor est immobilisé, ce qui entraîne une absence de manifestation au niveau du végétal, cependant son action est défavorable sur le sol quand sa concentration est supérieure à 50 mg/l (SING et *al.*, 1978).

IV.3 Autres utilisations :

Il rentre dans la fabrication de matériaux de construction tel que le plâtre, ciment, etc...

CONCLUSION

Les phosphates naturels et tous les dérivés (refus et phosphogypse) sont des composés intervenant dans différents domaines. Ils entrent dans la composition de matériaux de construction, prennent part dans l'industrie alimentaire, dans le conditionnement des eaux et le stockage de l'énergie etc...

Dans le domaine agronomique leur impact est considérable sur les rendements, puisqu'ils apportent l'élément phosphore, présent mais souvent en faible quantité dans les sols Algériens, et d'autres éléments tels que le calcium et oligo éléments.

De nombreux travaux (AMAR, 1988; DJALEM, 1988; GUERIN, 1988; HALFAOUI, 1988; TRUONG, 1988; etc...) ont montrés le rôle des phosphates naturels et leurs dérivés sur l'amélioration des propriétés physico-chimiques de sols particuliers tels que les sols acides.

En Algérie, les sols sont très carencés en P_2O_5 , un apport de phosphore est donc nécessaire (HAMADI, 1971; REZIG, 1978). Dans le but de couvrir les besoins de l'agriculture en cet élément l'état a favorisé le développement de l'industrie phosphatière. A titre expérimental l'utilisation des phosphates naturels de djebel Onk a donné des rendements satisfaisants à travers l'amélioration des caractères agrobiologiques des sols (HALFAOUI, 1988; SIFAOUI, 1988).

Qu'ils soient utilisés à l'état bruts, sous forme de refus (dépoussiérés, calcinés et grillés courbes) ou sous forme de sous produit de l'industrie des phosphates (phosphogypse), les phosphates naturels constituent un potentiel non négligeable car ils permettent l'amélioration des propriétés physico-chimiques de certains sols.

C'est pourquoi nous nous sommes intéressés au rapport entre les phosphates naturels et leur dérivés en vu de mieux évaluer leur impact sur la solubilité du phosphore , la quantité de phosphore assimilable et le pH des différents mélanges.

DEUXIEME PARTIE:
MATERIEL ET METHODES

CHAPITRE V - MATERIEL D'ETUDE:

Lors de cette étude expérimentale, nous avons utilisé trois types de matériel : les phosphates , le sol et le végétal.

V.1.- Formes de phosphates utilisés :

V.1.1 - Le phosphogypse (P.G) :

Le phosphogypse utilisé provient du complexe ASMIDAL d'Annaba. Ses caractéristiques sont données dans le tableau IV.1 .

V.1.2 - Les rejets de phosphate (R.D):

Les rejets de phosphate utilisés sont ceux dépoussiérés. Nous n'avons pris que le refus qui passe à travers les mailles d'un tamis de 1mm. Il provient des mines de djebel Onk.

V.1.3 - Le phosphate naturel (P.N) :

Le phosphate naturel utilisé provient, lui aussi, de djebel Onk.

La première partie de notre travail s'effectue sur des mélanges de rejets de phosphate (R.D) et de phosphogypse (P.G). Selon les proportions données dans le tableau V.1 .La seconde partie porte sur des mélanges de phosphate naturel (P.N) et de phosphogypse (P.G) selon les teneurs données dans le tableau V.2 . Le choix s'est porté sur les mélanges R.D/P.G et P.N/P.G pour différentes raisons parmi lesquelles nous citons :

- la grande solubilité du P.G qui pourrait faciliter la nutrition phosphatée en libérant le peu de phosphore qu'il contient.

- La réaction acide du P.G qui pourrait faciliter la solubilisation du P.N et des R.D .

- L'aspect économique de la fumure phosphatée, et de protection de l'environnement en rapport avec le phosphogypse rejeté à la mer actuellement .

Pour chaque travail réalisé les mélanges sont faits à sec dans des erlenmeyers . Afin d'assurer un bon contact entre les mélanges , nous saturons d'eau puis nous laissons sécher dans une étuve à une température de 40°C . Les mélanges obtenus sont broyés et tamisés à 1mm.

TABLEAU V.1 :- PROPORTIONS DE MELANGES RD/PG.

RD (%)	PG (%)	Poids de PG (g)	Poids de RD (g)
0	100	40	00
10	90	36	04
20	80	32	08
30	70	28	12
40	60	24	16
50	50	20	20
60	40	16	24
70	30	12	28
80	20	08	32
90	10	04	36
100	0	00	40

TABLEAU V.2 :- PROPORTIONS DES MELANGES PN/PG.

PN (%)	PG (%)	Poids de PG (g)	Poids de PN (g)
0	100	40	00
10	90	36	04
20	80	32	08
30	70	28	12
40	60	24	16
50	50	20	20
60	40	16	24
70	30	12	28
80	20	08	32
90	10	04	36
100	0	00	40

V.2 - Les sols utilisés :

Notre choix a porté sur deux types de sol, l'un calcaire (noté C) et l'un non calcaire (noté S), tous deux ayant une teneur très faible en phosphore assimilable . Les échantillons prélevés sont obtenus à l'aide d'une tarière et ce sur les premiers 30 cm des sols .

V.2.1 - Sol C :

L' échantillon prélevé a une humidité moyenne, une couleur de 7,5 YR 4/4 . Il est caractérisé par très peu de matière organique, d'oxydes et d'hydroxydes, par une structure fine, une texture limono-argileuse et par une charge très élevée.

L' échantillon de ce sol a été prélevé au piedmont Est de l'Atlas Blidéen , à 200 m d'altitude environ. Le sol est recouvert d'olivier et de végétation herbacée (trèfle, luzerne, graminées etc ...).

V.2.2 - Sol S :

L' échantillon est prélevé à environ 300m d'altitude, au piedmont Ouest de l'Atlas Blidéen. Le sol est recouvert de végétation herbacée et arbrisseaux (tréfle, calicotome, inule etc...). Les échantillons prélevés ont une humidité moyenne une couleur de 7,5 YR 4/3, quelques tâches rougeâtres sont observées, la charge est très forte (cailloux), beaucoup de racines et une faible porosité sont notées.

V.2.3 - Granulométrie des deux sols étudiés :

TABLEAU V.3 : ANALYSE GRANULOMETRIQUE .

SOLS	% A	% LF	% LG	% SF	% SG
C	18,8	26,6	29,3	10,9	14,4
S	20,8	48,2	1,5	15,1	14,4

Le sol C est un sol à texture limono - sablo - argileuse avec une prédominance de limons grossiers par rapport aux limons fins . Le sol S est un sol à texture limono - sablo-argileuse avec une prédominance de limons fins par rapport aux limons grossiers .

V.2.4 - Caractéristiques chimiques des sols C et S :

TABLEAU V.4 : CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES SOLS C ET S

Sols	pHeau	% CaCO ₃	% MO	P ₂ O ₅ (total) ppm	P ₂ O ₅ (ass) ppm	Complexe adsorbant (meq/100g de sol)				
						Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CEC
C	8.85	7.55	0.36	9.33	0.20	0.18	0.54	15.33	1.98	18.5
S	7.87	0.00	0.45	11.67	1.54	0.29	0.68	16.95	2.24	21.0

Le pH du sol C est de l'ordre de 8,85 , ce qui le fait classer dans la catégorie des sols très alcalins (GAUCHER, 1968) . Le pH du sol S est de l'ordre de 7,85 , on dira que nous avons à faire à un sol alcalin (GAUCHER ,1968) .

Le sol S est un sol non calcaire, par contre le sol C renferme 7.55% de calcaire total : Il est donc considéré comme sol moyennement calcaire.

Le sol C a un taux de matière organique de 0,36 % ceci est considéré très faible puisque le taux de matière organique souhaitable pour une teneur de 10 à 30 % d'argile devrait être entre 2 et 2,5 % . Il en est de même pour le sol S. On peut dire que les sols C et S sont tous deux pauvres en matière organique . Les teneurs en phosphore assimilable des sols C et S toutes deux très faibles puisqu'elles sont inférieures à 5 p.p.m.

Pour le sol C l'ion Calcium est celui qui est en plus grande quantité sur le complexe adsorbant . Les autres cations échangeables (Na ,K et Mg) ont des valeurs beaucoup plus faibles. On note que l'ion Mg vient en seconde position et que l'ion Na est en dernière position ; quant à la C.E.C, elle est modérée.

Pour le sol S l'ion calcium domine sur le complexe adsorbant, viennent ensuite, par ordre décroissant l'ion Mg puis l'ion K puis le Na ; la C.E.C est modérée. On constate que pour le sol S les différentes valeurs d'ions et la C.E.C sont plus élevées que pour le sol C.

V.3 - Le matériel végétal :

Lors de notre expérimentation nous avons utilisé deux types de végétaux : une légumineuse :VESCE (*Vicia sativa*) et une graminée: ORGE (*Hordeum vulgare*). La vesce a été choisie car elle présente un système racinaire qui permet la solubilisation de phosphates peu solubles, et l'orge a été utilisé pour une comparaison entre deux familles à savoir légumineuses et graminées.

Lors de notre expérimentation, la variété de vesce utilisée est la variété CHELIFF. Cette variété est caractérisée par une population variétale semi précoce . En plein champs, elle fleurit fin mars en zone littorale et mi-avril en altitude. C'est une variété assez tolérante au froid, convenant aux régions à sols profonds et à hiver assez froid La vesce variété CHELIFF est productive. Pour l'orge c'est la variété SAIDA qui est utilisée, celle ci est une variété locale qui est très intéressante dans l'alimentation animale.

CHAPITRE VI - METHODOLOGIE D'ETUDE

VI.1 - Dispositif expérimental : méthode STANDFORT-DE MENT

Afin de réaliser notre étude nous avons opté pour le protocole expérimental basé sur la méthode STANDFORT-DE MENT (QUEMENER, 1968; LOMBART, 1987).

Cette méthode présente l'avantage d'être rapide car la durée de travail est de trois semaines environ, ceci d'une part, de même qu'elle permet un gain d'espace car elle préconise des pots de faible diamètre.

VI.1.1 - Principe de la méthode STANDFORT-DE MENT :

Le principe de la technique STANDFORT-DE MENT consiste à utiliser une culture carencée en un élément (P ou K) sur un substrat inerte (sable purifié) dans un récipient sans fond. Quand un feutrage de racines se développe à la base du pot, nous soulevons ce dernier afin d'y placer en dessous un second pot, qui, lui, contient du sol, de façon à ce que les racines soient en contact avec le sol du second récipient. Après 21 jours le végétal est alors récolté pour doser l'élément choisi.

VI.1.2 -Mode opératoire :

Dans un pot N°1 en polyéthylène de dimensions 7x6cm privé de fond nous avons mis de la tarlatane puis du sable de rivière lavé pendant 24 heures avec de l'HCl (10 %) et rincé avec de l'eau distillée. Dans chaque pot nous mettons 160 g de sable purifié puis nous y déposons 13 graines de la culture choisie (orge et vesce dans notre cas).

Un arrosage se fait avec une solution nutritive unique (annexe I) à raison de 22ml versés lors du semis dans un récipient placé sous le pot N°1. Les pots sont alors recouverts de papier d'emballage pour éviter les pertes d'eau et mis à l'étuve à une température de 25°C. Après 48 heures, les graines non germées sont remplacées par d'autres préparées en plus, dans les mêmes conditions, à cet effet. A ce stade là nous parlons de la levée. Les graines sont alors recouvertes de 40 g de sable purifié. L'arrosage des pots se fait tous les deux jours avec la solution nutritive à raison de 9 ml par pot; de même chaque jour la tare est rétablie à 244g avec de l'eau distillée, le poids étant suffisamment uniforme. L'étape suivante, qui correspond au 14 ème jour après la levée, est appelée le *transfert*. A ce stade une importante masse de racines couvre le bas du pot N°1. Ce développement racinaire est favorisé par une rotation journalière des pots.

Lors de ce transfert, un pot N°2 de dimensions 8 x 8 X 7,5cm, contenant 200g de sol (C ou S selon le traitement) est placé sous le pot N°1 auquel le récipient d'arrosage est retiré. Les racines des cultures utilisées sont alors en contact direct avec le sol. Sous le pot N°2 le récipient d'arrosage est alors remplacé, pour les apports d'eau, qui se font en moyenne tous les 2 jours, au vu de la réserve d'eau. Pour obtenir les meilleures conditions nous avons réalisé notre essai dans un phytotron de marque HERAEUS VÖTSCH.

Les conditions d'expérimentation sont les suivantes :

- températures : de jour :27°C
de nuit :20°C
- éclairage :distribué de 21 heures à 12 heures
- humidité : 70% le jour
90% la nuit

15 à 20 jours après le transfert, la récolte des parties aériennes a lieu, à ras du bord du pot N°1 .

Le matériel végétal est mis dans un flacon taré avec bouchon et prénumérotation. Le flacon ouvert est mis à l'étuve à une température de 75°C (LOMBAERT, 1987). Après 48 heures, le flacon est alors retiré de l'étuve, rebouché puis pesé. Le matériel végétal est ensuite broyé finement puis stocké dans des sachets afin de pouvoir déterminer sa composition minérale.

VI.2 - Analyses effectuées :

VI.2.1 - sur les mélanges P.N/P.G et R.D/P.G :

Sur chaque quantité des différents mélanges a été évaluée :

- le pH : cette mesure est effectuée sur une suspension de R.D/P.G (et P.N/P.G) dans de l'eau distillée selon un rapport 1/2,5. Après 4 heures de repos de la suspension les pH sont mesurés.

- la solubilité du phosphore dans trois types de solvants, à savoir l'acide citrique à 2%, l'eau et le citrate d'ammonium (0,5N) à pH 7.

Pour tester la solubilité du phosphore nous avons procédé comme suit : 1g de mélange P.G/R.D (ou P.G/P.N) est ajouté à 100ml de chacun des trois solvants. La suspension est agitée durant une heure puis filtrée. Le phosphore ainsi solubilisé est alors dosé selon la méthode OLSEN. Les solvants utilisés sont choisis car la valeur commerciale des engrais n'est pas seulement déterminée par leur richesse en substance fertilisante mais aussi par leur solubilité dans les solvants eau acide citrique, citrate d'ammonium etc ...

Par ailleurs, la plante a la faculté de solubiliser des éléments nutritifs du sol et de sécréter des solutions physiologiques souvent acides, dont la plupart sont de l'acide formique mais aussi de l'acide tartrique, acide citrique etc...(HALFAOUI, 1988)

VI.2.2 - Sur les sols C et S:

- L'analyse granulométrique : Les pourcentages des différentes fractions sont déterminées par la méthode internationale par sédimentation à la pipette ROBINSON. La texture de nos échantillons de sol est déterminée par le diagramme granulométrique de JAMAGNE (1967) cité par DUCHAUFOR, 1970.

- Le pH est mesuré dans une suspension de terre dans de l'eau distillée. Le rapport terre/eau = 1/2,5.

- la solubilité du phosphore dans trois types de solvants, à savoir l'acide citrique à 2%, l'eau et le citrate d'ammonium (0,5N) à pH 7.

Pour tester la solubilité du phosphore nous avons procédé comme suit : 1g de mélange P.G/R.D (ou P.G/P.N) est ajouté à 100ml de chacun des trois solvants. La suspension est agitée durant une heure puis filtrée. Le phosphore ainsi solubilisé est alors dosé selon la méthode OLSEN. Les solvants utilisés sont choisis car la valeur commerciale des engrais n'est pas seulement déterminée par leur richesse en substance fertilisante mais aussi par leur solubilité dans les solvants eau acide citrique, citrate d'ammonium etc ...

Par ailleurs, la plante a la faculté de solubiliser des éléments nutritifs du sol et de sécréter des solutions physiologiques souvent acides, dont la plupart sont de l'acide formique mais aussi de l'acide tartrique, acide citrique etc...(HALFAOUI, 1988)

VI.2.2 - Sur les sols C et S:

- L'analyse granulométrique : Les pourcentages des différentes fractions sont déterminées par la méthode internationale par sédimentation à la pipette ROBINSON. La texture de nos échantillons de sol est déterminée par le diagramme granulométrique de JAMAGNE (1967) cité par DUCHAUFOR, 1970.

- Le pH est mesuré dans une suspension de terre dans de l'eau distillée. Le rapport terre/eau = 1/2,5.

La mesure du pH est effectuée après 4 heures de repos de la suspension.

- Le calcaire total : Le dosage se fait par l'HCl selon la méthode volumétrique au calcimètre de BERNARD.

- La matière organique a été déterminée par la méthode ANNE.

- Le phosphore total : Le sol est attaqué à l'ébullition par l'acide nitrique concentré; l'excès d'acide est éliminé par évaporation et le résidu est repris par de l'acide sulfurique (N). Le phosphore dissous dans cet acide est alors dosé par colorimétrie à 650nm.

- Le phosphore assimilable : Selon le type de sol nous avons utilisé la méthode OLSEN (sol C) ou la méthode JORET HEBERT (sol S).

- Les bases échangeables : La méthode METSON est basée sur une saturation du sol par percolation d'acétate de sodium tamponnée à pH 8,2. Un lavage à l'alcool est réalisé afin d'éliminer la solution d'extraction en excès. Pour déplacer l'ion sodium une solution d'acétate d'ammonium à pH 7 est percolée.

- La C.E.C est déterminée par l'utilisation d'acétate d'ammonium qui permet de déplacer les ions Na^+ saturants le complexe adsorbant selon la méthode BOWER.

Les différents ions sont dosés par spectrophotométrie de flamme et d'absorption atomique.

VI.2.3 - Sur les deux cultures utilisées :

Le matériel végétal utilisé, une fois récolté, est mis à sécher à l'étuve à une température de 75°C. Il est alors finement broyé afin d'obtenir une poudre. La minéralisation est faite par voie humide sur 200 mg de poudre végétale.

A la fin de la minéralisation, sur le filtrat obtenu, nous avons effectué les analyses suivantes :

- Le phosphore : le dosage est fait par colorimétrie.
- L'azote est dosé par la méthode de KJELDHAL.
- Les éléments K, Na, Mg et Ca sont dosés par spectrophotométrie ainsi que les éléments Cu, Zn et Mn.

VI.3 - Calcul de la fumure phosphatée:

VI.3.1 - Conversions :

$$F = (T_o - T_A) \cdot C$$

- Soit F la dose de fumure phosphatée à apporter en g de $P_{25}O_5$ / 100g de sol.
- Soit T_o la teneur théorique optimale de phosphore assimilable exprimée en ppm de $P_{25}O_5$, cette quantité T_o est en général évalué à 56 p.p.m ; c.a.d 56 mg $P_{25}O_5$ / 1000 mg de sol = $56 \cdot 10^{-4}$ g $P_{25}O_5$ / 100g de sol,
- Soit T_A : Teneur actuelle du sol correspondant à la teneur du sol lors de la mise en place de l'essai. Elle est exprimée en g de $P_{25}O_5$ / 100g de sol.
- Soit C le Coefficient de majoration ; celui ci est fonction du pH du sol.

En effet : - pH < 6 , C = 1,7 .

6 < pH < 7,5, C = 1,3.

- pH > 7,5 C = 1,8

- Les mélanges de phosphate dosent à :

1,5% de P_2O_5 pour le P.G.

29% de P_2O_5 pour le P.N.

45% de P_2O_5 pour le T.S.P.

c.a.d pour le P.G la quantité de PG à ramener sera égale à :

$X.100/1,5$ g de P.G/100g de sol

de même pour le P.N la dose de PN à ramener sera égale à :

$X.100/29$ g de P.N/100g de sol

et pour le T.S.P la quantité de TSP à ramener sera égale à :

$X.100/45$ g de T.S.P/100g de sol.

VI.3.2 - Calcul des doses de fumures apportées :

a/ Pour le sol S :

Soit $F=Xg$ de $P_2O_5/100g$ de terre.

Nous devons évaluer les quantités de P.G, P.N, T.S.P et (P.N + P.G noté N.G) à apporter au sol S afin que la teneur en phosphore assimilable soit optimale (T_0), par conséquent soit égal à $56.10^{-4}g/100g$

Soit $TA = 1,54p.p.m = 0,154mg/100g$ de sol = $154.10^{-6}g$.

Le pH du sol S étant de 7,87, C = 1,8 $F = (0,0056-0,000154).1,8 = 98028.10^{-7}g$ de $P_2O_5/100g$ de sol = X.

- Quantités de P.G à ramener : $X .100/ \% PG =$

$98028.10^{-7} . 100/1,5 = 65352g$ de P.G/100g de sol.

Pour notre expérimentation nous avons utilisé 200g de sol, donc la quantité de P.G à ramener est de 1,30704g.

- Quantités de P.N à ramener : $X.100/\% \text{ P.N} = 0,0098028. 100/29 = 0,033802758\text{g}$ de P.N/100g de sol ; soit 0,067605517g de P.N pour notre expérimentation.

- Quantités de T.S.P à apporter : $X.100/\% \text{ T.S.P} = 0,0098028 . 100/45 = 0,021784\text{g}$ de T.S.P/100g de sol, soit 0,043568 g de T.S.P pour notre expérimentation.

- Quantités de mélange (P.N+P.G) à ramener : $X.100/\% (\text{ P.N+P.G })/2 = X.100/(1,5 \% + 29\%) / 2 = X.100/15,25\% = 0,0098028.100/15,25 = 0,0643\text{g}$ de mélange de (P.N+P.G) pour 100g de sol, c.a.d que pour nos essais nous apportons 0,0643g de P.N et la même quantité de P.G.

b/ Pour le sol C:

Nous procédons comme précédemment pour connaître les quantités de P.G, P.N, T.S.P et (NG) à ramener à notre sol en indiquant cette fois ci que TA = 0,20 p.p.m et que le pH du sol C est de 8,85 ; par conséquence C = 1,8.

TABLEAU VI.1 : RECAPITULATIF DES DOSES DE FUMURE A APPORTER SUR LES SOLS C ET S

sols	dose de fumure à ramener (g)			
	PG	PN	TSP	PG + PN
C	0,0134	0,0693	0,0446	0,0659
S	1,3070	0,0676	0,0436	0,0643

Pour les mélanges P.N/P.G et R.D/P.G les paramètres évalués sont la solubilité du phosphore dans les solvants eau, acide citrique et citrate d'ammonium, d'une part, et le phosphore assimilable d'autre part. Pour les sols utilisés un dosage de phosphore assimilable et total a été effectué avant la mise en place du matériel végétal.

Par ailleurs, un dosage de la composition minérale des deux végétaux est réalisé en fin d'expérimentation. Le dosage a porté sur les éléments N, P, K, Ca, Mg, Na, Zn, Cu et Mn.

TROISIEME PARTIE:

RESULTATS ET INTERPRETATION

CHAPITRE VII -EFFET DES MELANGES PHOSPHATE NATUREL-PHOSPHOGYPSE (PN/PG) SUR LA SOLUBILITE ET LA DISPONIBILITE DU PHOSPHORE.

La première étape de notre expérimentation consiste à réaliser des mélanges, à différentes proportions, entre le phosphate naturel et le phosphogypse et de voir l'influence des doses de mélange sur le pH et sur la solubilité du phosphore dans les solvants eau, acide citrique 2% et citrate d'ammonium neutre.

VII.1- Effet des mélanges P.N/P.G sur le pH:

Les variations du pH(eau) en fonction des rapports P.N/P.G sont illustrées par la figure 7.1. D'après l'échelle des pH donnée par DIBBE (1977) nous constatons que le P.G seul (dose 0/40) est extrêmement acide (le pH est de l'ordre de 2,5); au contraire le phosphate naturel seul (proportion 40/0) a un pH légèrement alcalin (de l'ordre de 8).

Quand les mélanges sont réalisés, on observe aussitôt une nette augmentation du pH (de l'ordre de 5) pour le mélange 4/36. Les variations de pH se font ensuite plus progressivement, de façon légèrement curviligne. Pour les pH proches de la neutralité nous retenons les mélanges 16/24, 20/20 et 24/16 ; ce sont les mélanges où les quantités de P.N et P.G sont presque égales, par conséquent le caractère alcalinisant l'emporte sur celui acide du phosphogypse.

L'analyse de variance (tabl.VII.1) révèle que les différences entre traitements sont très hautement significatives (T.H.S).

Nous observons 6 groupes homogènes (tabl.VII.2) dont le groupe B est composé des mélanges proches de la neutralité à savoir les proportions 16/24, 20/20 et 24/16.

Les traitements 40/0, 32/8, 36/4 et 28/12 se caractérisent par un pH basique et les doses 12/28 et 0/40 par un pH légèrement acide à très acide.

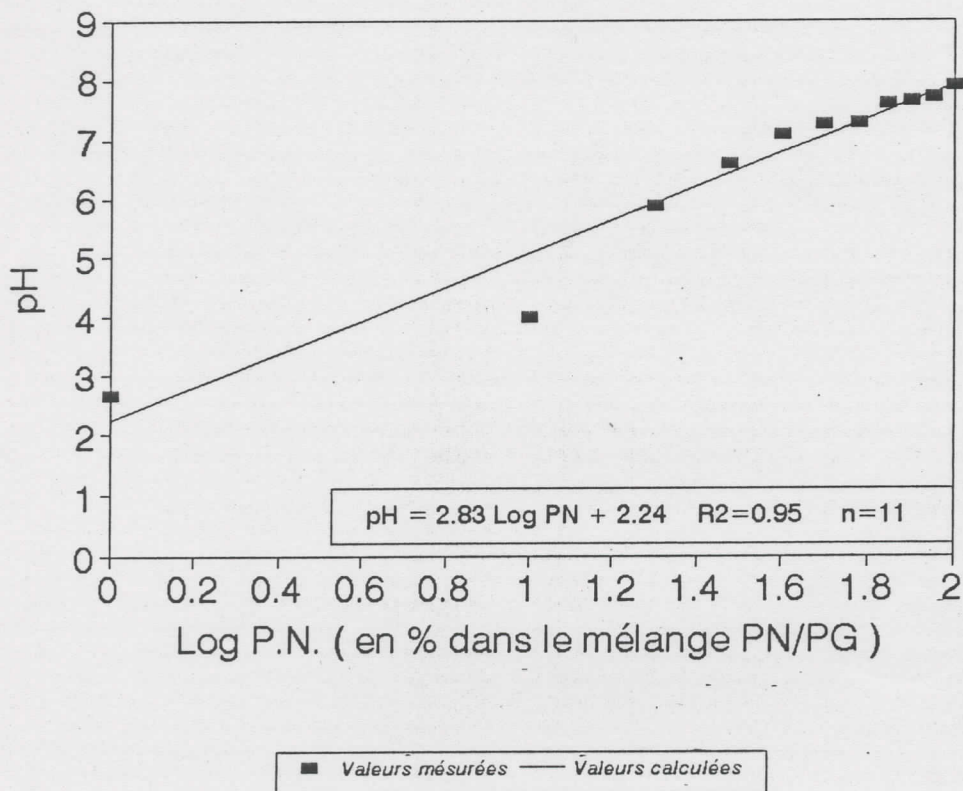


FIGURE 7.1 :- pH (EAU) DES DIFFERENTS MELANGES PN/PG.

TABLEAU VII.1 : ANALYSE DE LA VARIANCE:

Effet des mélanges P.N/P.G sur la variation du pH

Source de variation	S.C.E	D.D.L	C.M	Test F	Prob.	Signif
Variation totale	76,60	32	2,39			
Facteur étudié	76,23	10	7,62	450,88	0,0000	T.H.S
Variation résiduelle	0,37	22	0,02			

TABLEAU VII.2 : TEST NEWMAN-KEULS (seuil = 5%)

Doses de PN/P.G (g)	Moyennes (pH)	Groupes homogènes
40/0	7,89	A
32/8	7,70	A
36/4	7,63	A
28/12	7,60	A
24/16	7,27	B
20/20	7,26	B
16/24	7,09	B
12/28	6,59	C
8/32	5,87	D
4/36	4,01	E
0/40	2,65	F

VII.2 - Effet des mélanges sur la solubilité du phosphore
dans différents solvants:

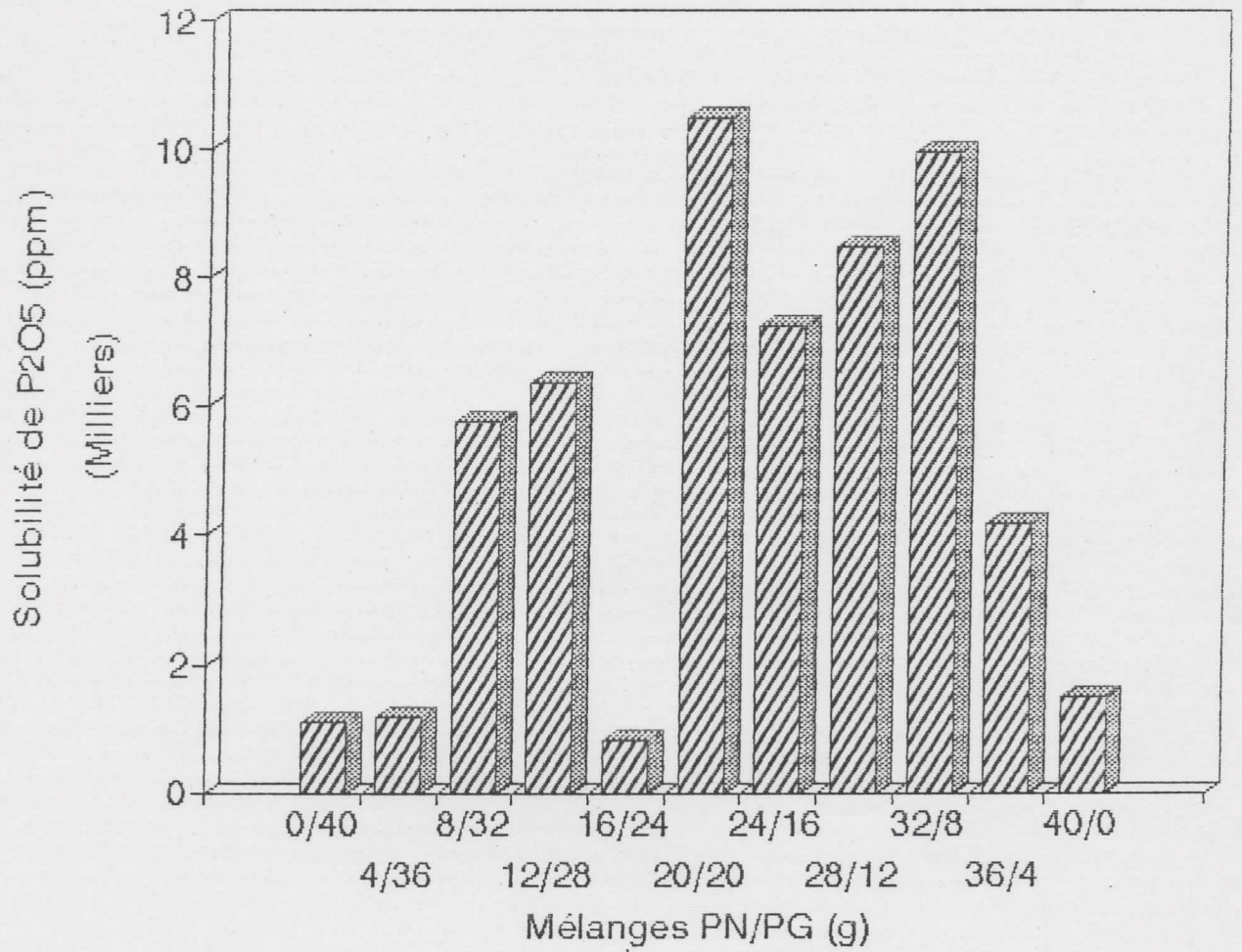
VII.2.1-Solubilité dans l'eau :

Nous remarquons que d'une façon générale, les fortes proportions de P.N donnent une meilleure solubilité dans l'eau que les faibles mélanges (fig.7.2). La meilleure solubilité est donnée par le mélange 20/20 et la plus faible solubilité par le mélange 16/24.

La forte solubilité semble être en relation avec la neutralité du pH puisqu'une faible solubilité est observée pour le traitement 0/40 ayant un pH acide.

Comme l'indiquent les travaux de GERDAT (1977) et RAJU (1988) ; le P.N mélangé au P.G donne un traitement enrichi tant en CaCO_3 qu'en soufre favorisant ainsi la solubilité du phosphore.

L'analyse de variance fait apparaître un effet proportion très hautement significatif sur la solubilité dans l'eau (tabl.VII.3). Les proportions présentant la meilleure solubilité dans l'eau sont celles des mélanges 20/20 et 32/8 (tabl.VII.4). La faible solubilité dans l'eau peut être due au fait qu'il y'a immobilisation rapide, en présence de calcaire, vers des formes Ca-P qui, elles, sont de faible solubilité (HOOKER et al, 1980). De façon générale, nous observons de fortes variations de la solubilité dans l'eau pour les différents mélanges.



**FIGURE 7.2 :- SOLUBILITE DU PHOSPHORE DANS L'EAU
POUR LES MELANGES PN/PG.**

TABLEAU VII.3: ANALYSE DE LA VARIANCE:

Effet des mélanges P.N/P.G sur la solubilité dans l'eau.

Source de variation	S.C.E	DDL	C.M	TEST F	PROB.	SIGN
Variation totale	4478362630	32	15573892			
Facteur étudié	4401786300	10	40178632	9,15	0,0000	T.H.S
Variation résiduelle	496576320	22	4387832,50			

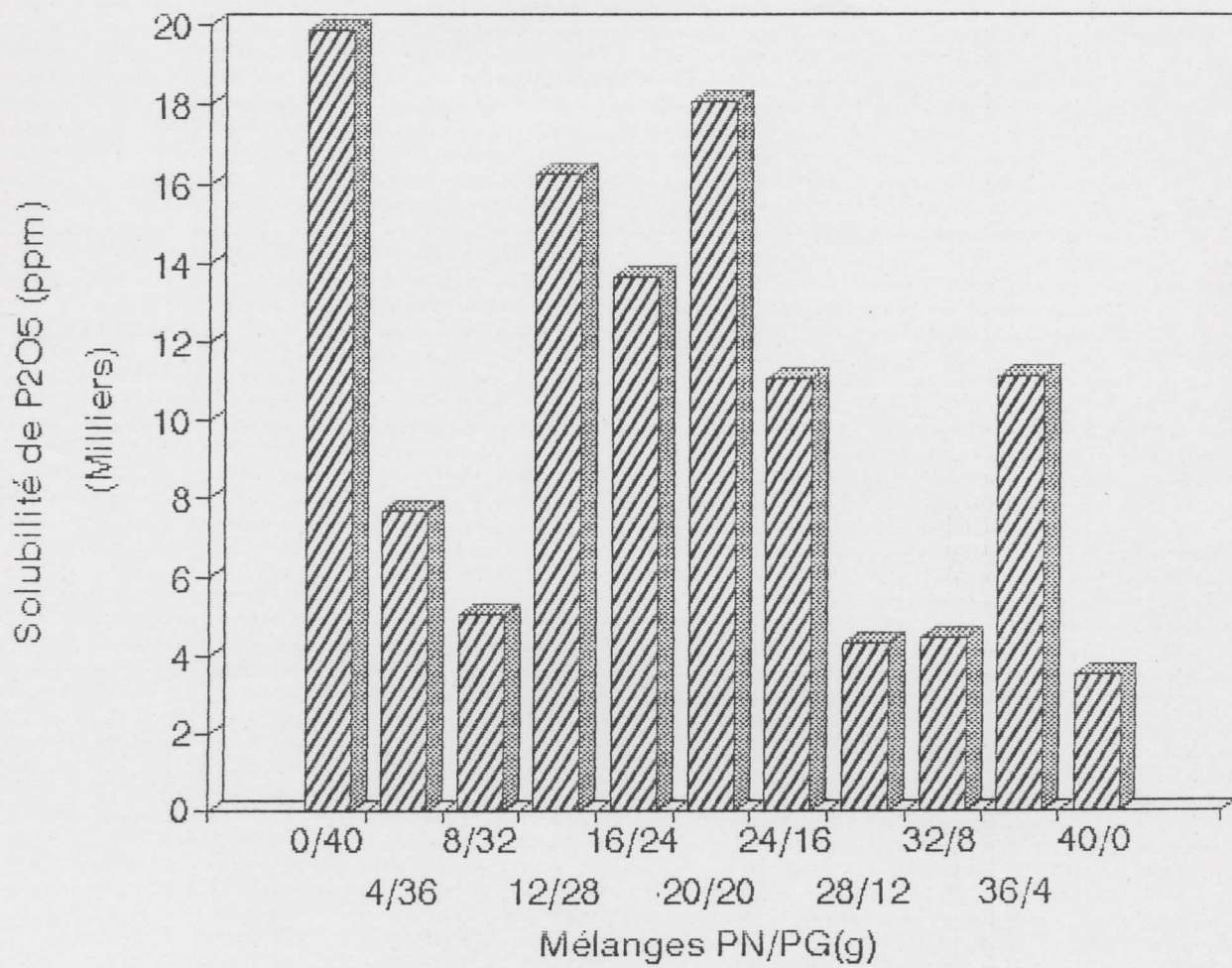
TABLEAU VII.4 : TEST NEWMAN-KEULS (seuil = 5%)

Doses de PN/P.G (g)	Moyennes P_2O_5 soluble (mg/l)	Groupes homogènes
20/20	10446,47	A
32/8	9966,67	A
28/12	8450,00	A B
24/16	7233,33	A B
12/28	6333,33	A B C
8/32	5733,33	A B C
36/4	4173,33	B C
40/0	1500,00	C
4/36	1166,67	C
0/40	1100,00	C
16/24	796,67	C

VII.2.2-Solubilité dans l'acide citrique à 2% :

Les résultats de cet essai (fig.7.3) montrent que la solubilité dans l'acide citrique la plus élevée est obtenue par le phosphogypse seul rapport (0/40); pour les autres proportions de mélange la solubilité est à peine plus faible (notamment pour le rapport 20/20) à beaucoup plus faible (pour le traitement 40/0). Les différents mélanges ne laissent apparaitre aucune différence significative (tabl.VII.5). La proportion 20/20 est caractérisée par un pH presque neutre ; les acides organiques ont une efficacité bonne pour des valeurs de pH très basses (BENCHAAAR, 1987).

La solubilité est meilleure pour les traitements sans P.N, ceci confirme les travaux de GERDAT (1977) qui affirment que le P.N seul a une faible solubilité mais que, mélangé au P.G, sa solubilité est améliorée.



**FIGURE 7.3 :- SOLUBILITE DU PHOSPHORE DANS L'ACIDE CITRIQUE
POUR LES MELANGES PN/PG.**

TABLEAU VII.5 - ANALYSE DE LA VARIANCE:
Effet des mélanges P.N/P.G sur la solubilité
dans l'acide citrique a 2%

Source de variation	S.C.E	DDL	C.M	TEST F	PROB.	SIGN
Variation totale	42134273920	32	66696060			
Facteur étudié	4988597140	10	90858712	1,70	1,1007	N.S
Variation résiduelle	41145686780	22	52076672			

TABLEAU VII.6 : TEST NEWMAN-KEULS (seuil = 5%)

Doses de PN/P.G (g)	Moyennes P_2O_5 soluble (mg/l)
0/40	19916,67
20/20	18066,67
12/28	16283,33
16/24	13616,67
36/4	11083,33
24/16	11016,67
4/36	7666,67
8/32	5066,67
32/8	4450,00
28/12	4333,33
40/0	2537,33

VII.2.3-. Solubilité dans le citrate d'ammonium

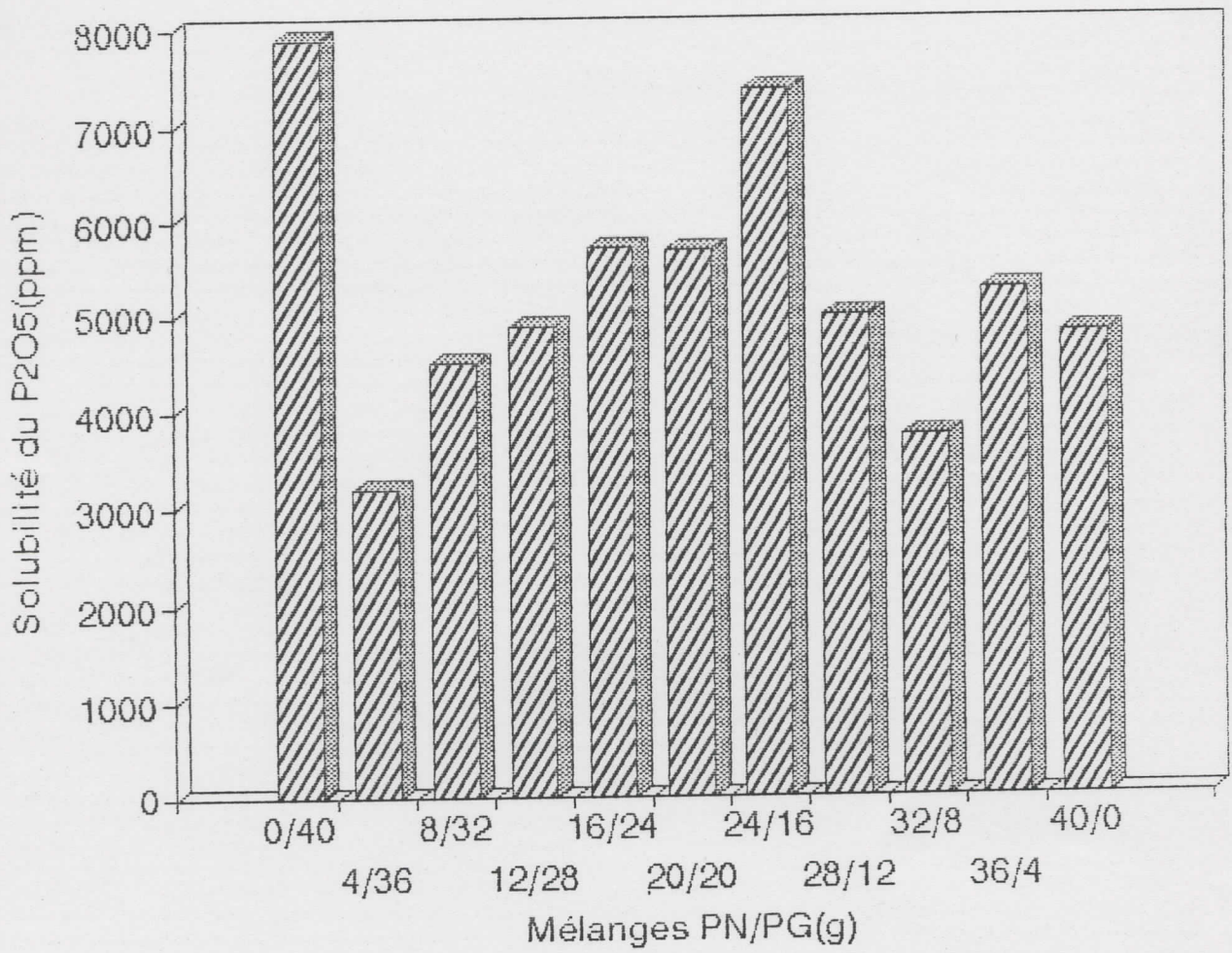
neutre:

Nous remarquons une solubilité élevée pour toutes les proportions de mélange, avec une dominance pour le mélange 0/40 (fig.7.4).

L'analyse de variance (tabl.VII.7) montre l'effet non significatif des traitements sur la solubilité dans le citrate d'ammonium. Dans les solvants, la solubilité est meilleure pour le rapport 0/40 dépourvu de phosphate naturel, surtout dans l'acide citrique à 2% ; l'apport de quantité croissante de P.N fait diminuer la solubilité du phosphore mais pas de façon proportionnelle. Par contre, pour ce même mélange (0/40) la solubilité dans l'eau est très faible (avant dernière position). Souvent le solvant eau offre la plus faible solubilité alors que le citrate d'ammonium neutre favorise la plus forte solubilité.

En effet, les composés insolubles à l'eau peuvent être dissous dans le citrate d'ammonium (JUNGE et WERNER, 1989). En fait la solubilité dans le citrate d'ammonium augmente car elle associe des carbonates libres (CHIEN et HAMMOND, 1978). La proportion 20/20 offre une excellente solubilité dans l'eau et une solubilité bonne à très bonne respectivement dans le citrate d'ammonium neutre et l'acide citrique à 2 % ; celle ci entrant dans la tranche des pH neutres.

BOUDJEMAA (1988) rapporte que plus les phosphates naturels sont riches en phosphore soluble dans les citrates, plus l'efficacité agronomique relative augmente. Les phosphates naturels ne peuvent se dissoudre à pH 7 ; c'est pourquoi, associés au phosphogypse, leur solubilité est améliorée (RYSER, 1986). La solubilité des phosphates naturels est donc liée au pH et au taux de phosphore (HARRISON et ADAMS, 1987).



**FIGURE 7.4 - SOLUBILITE DU PHOPHORE DANS LE CITRATE D'AMMONIUM
POUR LES MELANGES PN/PG.**

TABLEAU VII.7: ANALYSE DE LA VARIANCE :Effet des mélanges P.N/P.G sur la solubilité dans le citrate d'ammonium neutre.

Source de variation	S.C.E	DDL	.M	TEST F	PROB.	SIGN
Variation totale	4181753328	32	5 79791,50			
Facteur étudié	467220000	10	6 22000	1,29	0,2941	N.S
Variation résiduelle	4114533328	22	5 06060,50			

TABLEAU VII.8 : MOYENNES P₂O₅ SOLUBLE (mg/l)

Doses de PN/P.G (g)	Moyenn s
0/40	7900,00
24/16	7300,00
12/28	6866,67
40/0	6800,00
16/24	5700,00
20/20	5600,67
36/4	5233,30
28/12	5000,00
8/32	4500,00
32/8	3733,33
4/36	3200,00

VII.3- Comparaison de la solubilité des mélanges PN/PG

On définit la solubilité citrique (SC) d'un mélange comme étant la quantité de P_2O_5 extraite par le réactif citrique en pourcentage de la masse de mélange soumise à l'extraction. La solubilité citrique relative (SCR) est le rapport entre la quantité de P_2O_5 extraite par le réactif citrique et la quantité totale de P_2O_5 présente dans le mélange. On considère que la solubilité citrique des deux constituants est additive (SCHNEIDER, 1992).

Les essais réalisés ont permis d'évaluer la SC et la SCR pour les différents mélanges par la méthode indiquée ci dessus. De la même façon, nous avons déterminé une solubilité dans l'eau mesurée (SE) et relative (SER) et une solubilité dans le citrate d'ammonium mesurée (SCA) et relative (SCAR).

L'analyse des résultats (annexe 2) et la figure 7.5 font apparaitre une forte variation de la SE avec un minimum pour une teneur en P_2O_5 total de 12,5% et ce pour le mélange 16/24. Un maximum est obtenu pour une teneur de 15,5% (mélange : 20/20). Ces valeurs indiquent que la solubilité dans l'eau n'est pas en relation avec la teneur en P_2O_5 total.

De façon générale, on note que la solubilité dans l'eau est meilleure pour les mélanges que pour le PN ou le PG seuls. Concernant la solubilité citrique, on note de fortes variations en fonction des teneurs de P_2O_5 total. La solubilité la plus faible est obtenue par le PN seul, suivi des mélanges 28/12 et 32/8 .

Le maximum est atteint pour le PG seul, suivi des mélanges 20/20 et 12/28.

Ces résultats indiquent que des apports croissants de PN font baisser sensiblement la solubilité citrique (fig.7.5). Par ailleurs, l'allure de la courbe représentant la SCA est pratiquement semblable à celle de la SC, mais la SCA minimum étant ramenée par le mélange 4/36 ; la quantité croissante de PN entraîne une variation légère de la SCA.

Quant aux valeurs relatives des différentes solubilités (SCR, SER, SCAR), données par la figure 7.6, on remarque que la SER est la plus élevée pour les mélanges 32/8 (23,5% P_2O_5). Par contre, elle est très faible pour le mélange 40/0 (29% P_2O_5).

Ceci montre qu'en mélange la quantité de P_2O_5 solubilisée est meilleure que pour le PG seul ; ainsi, plus la quantité de P_2O_5 total augmente, plus la SER diminue. Pour la SCR, le meilleur taux est obtenu par le mélange 36/4 (26,24% P_2O_5) et le plus bas par le mélange 40/0 (29% P_2O_5).

Concernant la SCAR, celle-ci varie considérablement, avec un maximum pour le mélange 16/24 (12,5%) et un minimum pour le mélange 32/8 (23,5%).

On peut en déduire que les mélanges ont une solubilité relative, qui varie fortement avec la proportion du mélange et la nature du réactif utilisé. En effet, si on compare les différentes solubilités, on remarque que de façon générale, le solvant citrique donne les plus fortes valeurs de solubilité.

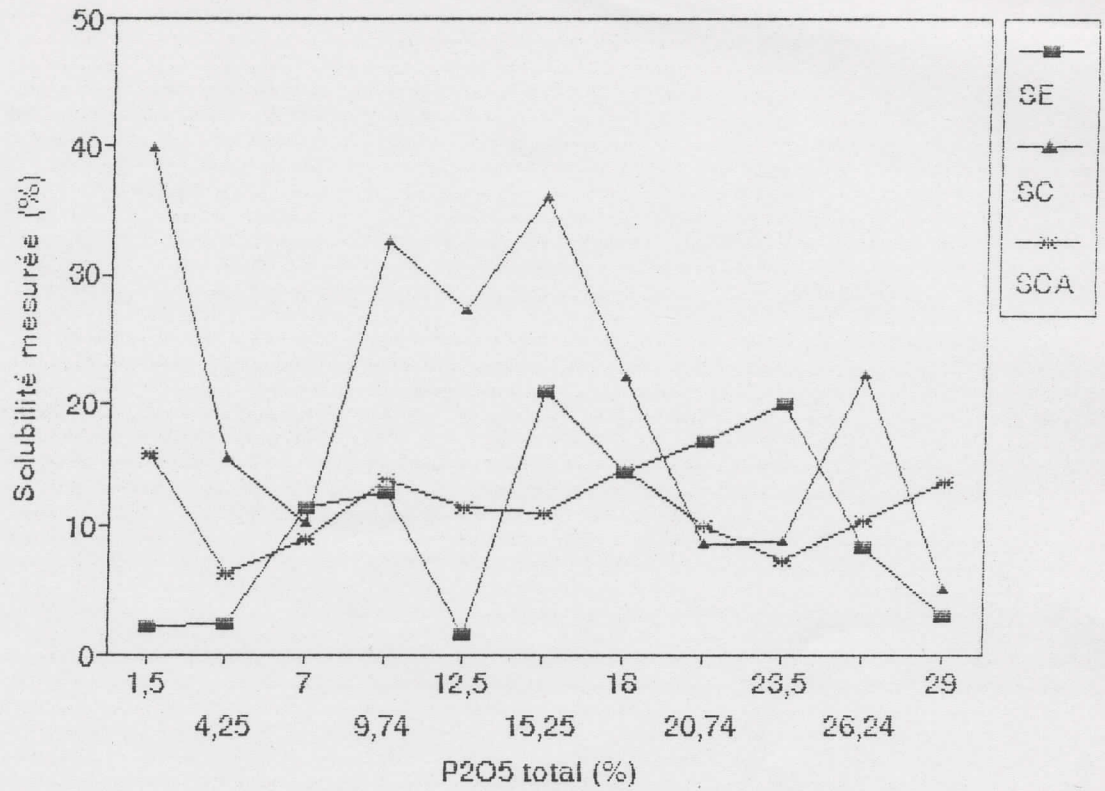


FIGURE 7.5 :- VARIATION DE LA SOLUBILITE MESUREE EN FONCTION DU PHOSPHORE TOTAL POUR LES MELANGES PN/PG.

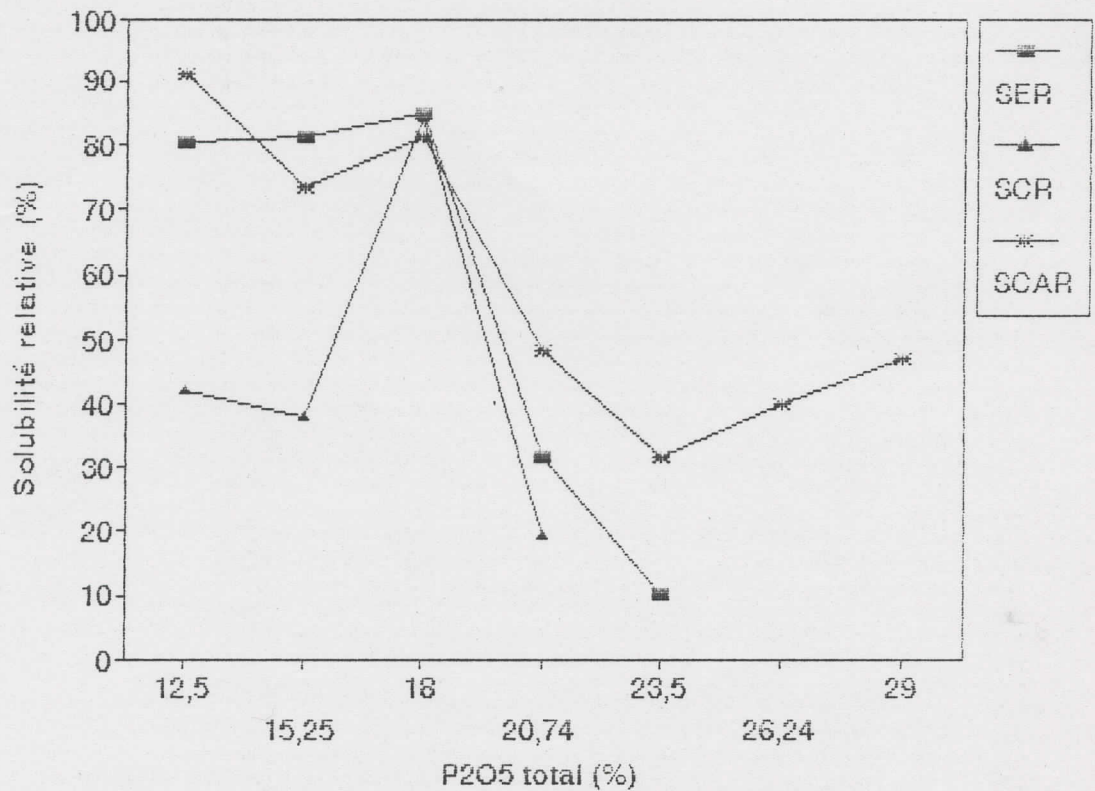


FIGURE 7.6 :- VARIATION DE LA SOLUBILITE RELATIVE EN FONCTION DU PHOSPHORE TOTAL POUR LES MELANGES PN/PG.

Quant aux autres solvants, il apparait que le citrate d'ammonium montre une certaine efficacité pour des teneurs en phosphore inférieures à 12,5% .Par contre, au delà de cette valeur, l'eau est le plus susceptible à solubiliser le phosphore. Nous remarquons que pour le mélange 40/0 (29%), l'acide citrique vient en deuxième position après le citrate d'ammonium, l'eau restant toujours le solvant le moins agressif pour solubiliser le phosphore. D'après ces constatations il semble qu'il y'a relation entre la teneur en P_2O_5 du mélange, celle du P_2O_5 extrait et la nature du solvant utilisé.

D'autre part, on remarque que pour le PG seul, la solubilité mesurée augmente en fonction du solvant utilisé (eau, citrate d'ammonium, acide citrique). Par contre, pour le PN seul, elle est faible en générale pour les trois solvants, mais, néanmoins, laisse apparaitre une légère supériorité du citrate d'ammonium ; l'eau restant le solvant le moins efficace.

Concernant la solubilité relative, on note que pour une teneur de 18% de P_2O_5 total, les différentes solubilités se confondent pour une valeur de l'ordre de 80% .

VII.4-Effet des mélanges sur la quantité de phosphore assimilable :

La quantité de phosphore assimilable, extraite par le bicarbonate de sodium, est très élevée puisqu'elle excède les 56 p.p.m, notamment pour les mélanges 0/40, 20/20 et 4/36. Les autres proportions de mélange sont relativement fortes et la quantité la plus faible est enregistrée pour le mélange 40/0 (fig.7.7).

Quant aux autres solvants, il apparait que le citrate d'ammonium montre une certaine efficacité pour des teneurs en phosphore inférieures à 12,5% .Par contre, au delà de cette valeur, l'eau est le plus susceptible à solubiliser le phosphore. Nous remarquons que pour le mélange 40/0 (29%), l'acide citrique vient en deuxième position après le citrate d'ammonium, l'eau restant toujours le solvant le moins agressif pour solubiliser le phosphore. D'après ces constatations il semble qu'il y'a relation entre la teneur en P_2O_5 du mélange, celle du P_2O_5 extrait et la nature du solvant utilisé.

D'autre part, on remarque que pour le PG seul, la solubilité mesurée augmente en fonction du solvant utilisé (eau, citrate d'ammonium, acide citrique). Par contre, pour le PN seul, elle est faible en générale pour les trois solvants, mais, néanmoins, laisse apparaitre une légère supériorité du citrate d'ammonium ; l'eau restant le solvant le moins efficace.

Concernant la solubilité relative, on note que pour une teneur de 18% de P_2O_5 total, les différentes solubilités se confondent pour une valeur de l'ordre de 80% .

VII.4-Effet des mélanges sur la quantité de phosphore assimilable :

La quantité de phosphore assimilable, extraite par le bicarbonate de sodium, est très élevée puisqu'elle excède les 56 p.p.m, notamment pour les mélanges 0/40, 20/20 et 4/36. Les autres proportions de mélange sont relativement fortes et la quantité la plus faible est enregistrée pour le mélange 40/0 (fig.7.7).

L'analyse de variance (tabl.VII.9) montre une très haute signification (T.H.S) de l'effet traitement sur la quantité de phosphore assimilable. Nous remarquons que les rapports performants sont en relation avec un pH acide à neutre, par contre pour le mélange 40/0 le pH est plutôt alcalin ; ceci révèle l'intervention du pH sur l'assimilabilité du phosphore (WHITE et TAYLOR, 1977).

Quand le pH augmente l'adsorption est alors diminuée et par conséquent l'assimilabilité du phosphore l'est aussi (GOLDBERG et SPOSITO, 1984) ; ceci est lié au potentiel électrostatique et à la charge négative (HOOKER et al, 1980).

Dans ce premier travail, il ressort les points suivants :

Tout d'abord l'effet traitement sur le pH est très hautement significatif ; les mélanges à quantité presque égale de phosphate naturel et phosphogypse correspondant aux pH proches de la neutralité.

L'effet traitement sur la solubilité dans les différents solvants fait ressortir l'acide citrique comme étant le meilleur solvant puisqu'il donne une grande à plus grande solubilité et ce en relation avec les pH neutres à acides respectivement, le rapport 20/20 est le plus convenable puisqu'il donne une solubilité bonne à excellente en relation avec la tranche de pH neutres : l'effet du pH est donc mis en évidence.

Enfin, pour le phosphore assimilable, les traitements performants sont observés pour les mélanges à pH acide à neutre.

TABLEAU VII.9: ANALYSE DE VARIANCE: Effet des mélanges de P.N/P.G sur la quantité de phosphore assimilable

Source de variation	S.C.E	DDL	C.M	TEST F	PROB.	SIGN
Variation totale	418287274	32	571477,31			
Facteur étudié	414000607	10	1400040,75	7,19	0,0001	T.H.S
Variation résiduelle	4286667	22	194848,50			

TABLEAU VII.10 : -TEST NEWMAN-KEULS (seuil = 5%)

Doses de PN/P.G (g)	Moyennes P_2O_5 soluble (mg/l)	Groupes homogènes
0/40	2800,00	A
20/20	2766,67	A
4/36	2666,67	A
8/32	2300,00	A B
24/16	2266,67	A B
28/12	2000,00	A B
12/28	1966,67	A B
16/24	1933,33	A B
36/4	1333,33	B C
32/8	1166,67	B C
40/0	700,00	C

CHAPITRE VIII- EFFET DES MELANGES REFUS DEPOUSSIERE'S PHOSPHOGYPSE (R.D/P.G) SUR LA SOLUBILITE ET LA DISPONIBILITE DU PHOSPHORE.

La seconde étape de notre étude porte sur l'évaluation de l'effet des mélanges entre refus dépoussiérés et phosphogypse sur le pH et sur la solubilité dans les solvants tels que l'eau, l'acide citrique et le citrate d'ammonium.

VIII.1 - Effet des mélanges sur le pH : Le pH (eau) des différents mélanges R.D/P.G (fig.8.1) varie entre 2,5 (pour le traitement 0/40) et 8 (pour le mélange 40/0). Nous remarquons que pour des proportions croissantes de phosphogypse le pH augmente d'abord brutalement, puis légèrement, restant aux alentours de la neutralité. D'autre part, nous observons un léger palier pour les traitements 24/16 et 20/20. Selon l'échelle des pH (DIBBE, 1977), le phosphogypse seul a un pH extrêmement acide, par contre le refus dépoussiéré a un pH légèrement alcalin.

En mélange, les rapports 28/12, 12/28 et 16/24 donnent un pH proche de la neutralité. Une petite quantité de R.D mélangée au P.G permet aussitôt une variation de pH de l'extrême acide à légèrement alcalin, ce qui démontre le rôle tampon des composés carbonatés.

L'analyse de variance (tabl.VIII.1) révèle une très haute signification de l'effet dose sur le pH (eau). La proportion 40/0 donne le pH le plus élevé et celle 0/40 le plus faible pH (tabl.VIII.2).

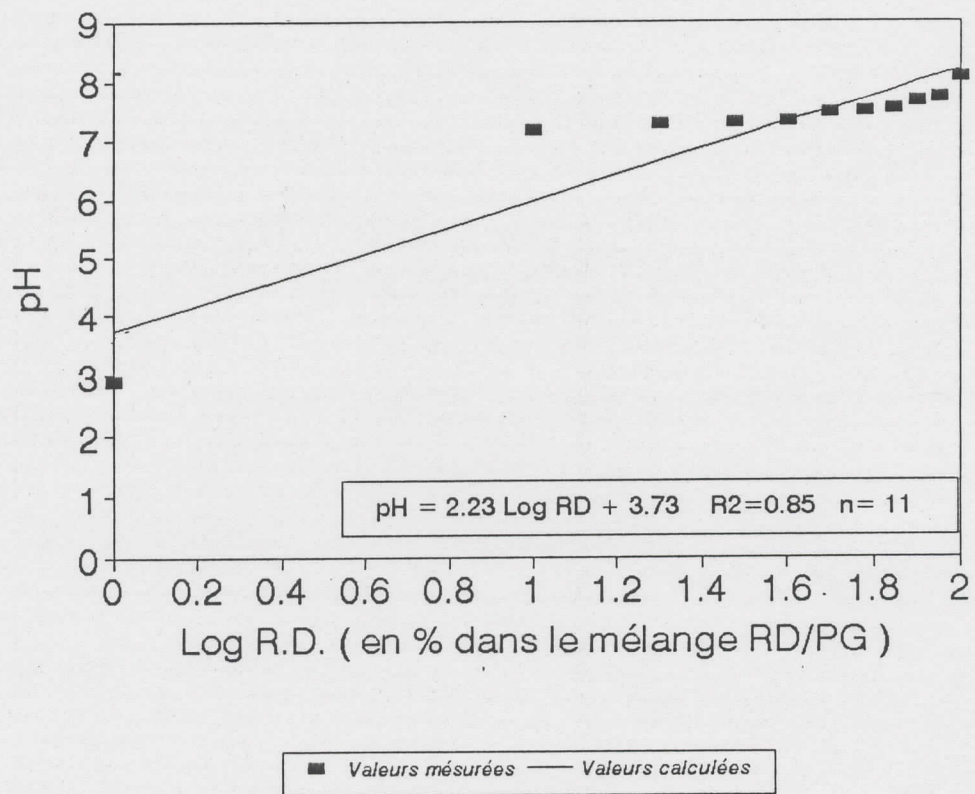


FIGURE 8.1 :- pH (EAU) DES DIFFERENTS MELANGES RD/PG.

TABLEAU VIII.1 : - ANALYSE DE LA VARIANCE :
Effet des mélanges R.D/P.G sur la variation du pH

Source de variation	S.C.E	D.D.L	G.M	Test F	Prob.	Signif.
Variation totale	60,61	32	1,89			
Facteur étudié	59,92	10	5,99	190,12	0,0000	T.H.S
Variation résiduelle	0,69	22	0,03			

TABLEAU VIII.2:- TEST NEWMAN-KEULS (seuil = 5%)

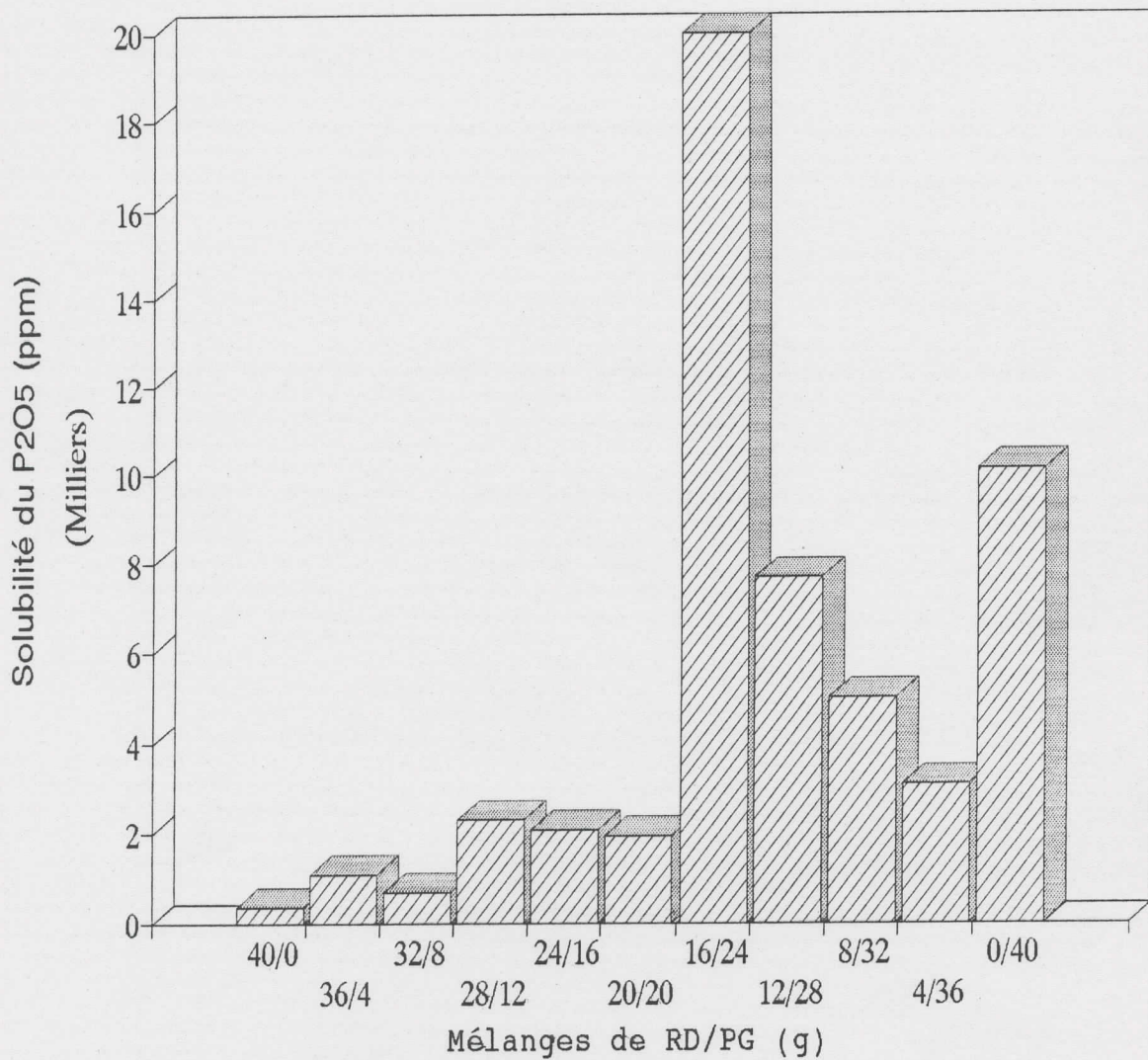
Doses de RD/PG (g)	Moyennes (pH)	Groupes homogènes
40/0	8,06	A
36/4	7,73	B
8/32	7,67	B C
32/8	7,53	B C
24/16	7,50	B C
20/20	7,47	B C
4/36	7,33	B C
28/12	7,30	B C
16/24	7,27	B C
12/28	7,17	C
0/40	2,90	D

VIII.2 - Effet des mélanges sur la solubilité du phosphore
dans différents solvants:

VIII.2.1-Solubilité dans l'eau :

Nous observons que la solubilité dans l'eau des différents mélanges est relativement faible, notamment pour le traitement 40/0 (fig.8.2). Par contre pour le mélange 16/24 la solubilité est satisfaisante ; celle ci correspond à un pH dans la tranche de la neutralité. Nous remarquons que la solubilité est plus élevée pour les quantités élevées de P.G, d'une part, et que même pour une variation très faible du pH (de l'ordre d'un dixième d'unité) la solubilité varie de façon nette.

L'analyse de variance (tabl.VIII.3) montre un effet traitement pour les mélanges R.D/P.G très hautement significatif. Nous constatons que le rapport 16/24 est celui qui donne la meilleure solubilité dans l'eau et que la proportion 40/0 est celle donnant la plus faible solubilité ; il y'a donc une certaine interdépendance entre le pH et la solubilité dans l'eau. D'autre part, l'ajout de P.G semble améliorer la solubilité. Ceci est probablement dû au soufre qui favorise une meilleure solubilité des phosphates (GERDAT, 1977; RAJU, 1988). Ainsi, l'apport de P.G améliore la solubilité (RYSER, 1986; RAJU, 1988) et celle ci (et par conséquent l'efficacité) est meilleure pour les pH < 6; ce qui confirme les travaux de TRUONG (1988).



**Figure 8.2 :- SOLUBILITE DU PHOSPHORE DANS L'EAU
POUR LES MELANGES RD/PG.**

TABLEAU VIII.3 : - ANALYSE DE LA VARIANCE : Effet des mélanges R.D/P.G sur la solubilité du phosphore dans l'eau.

Source de variation	S.C.E	DDL	C.M	TEST F	PROB.	SIGN
Variation totale	2916684000	32	91146376			
Facteur étudié	2132649980	10	213264992	5,98	0,0003	T.H.S
Variation résiduelle	784034050	22	35637912			

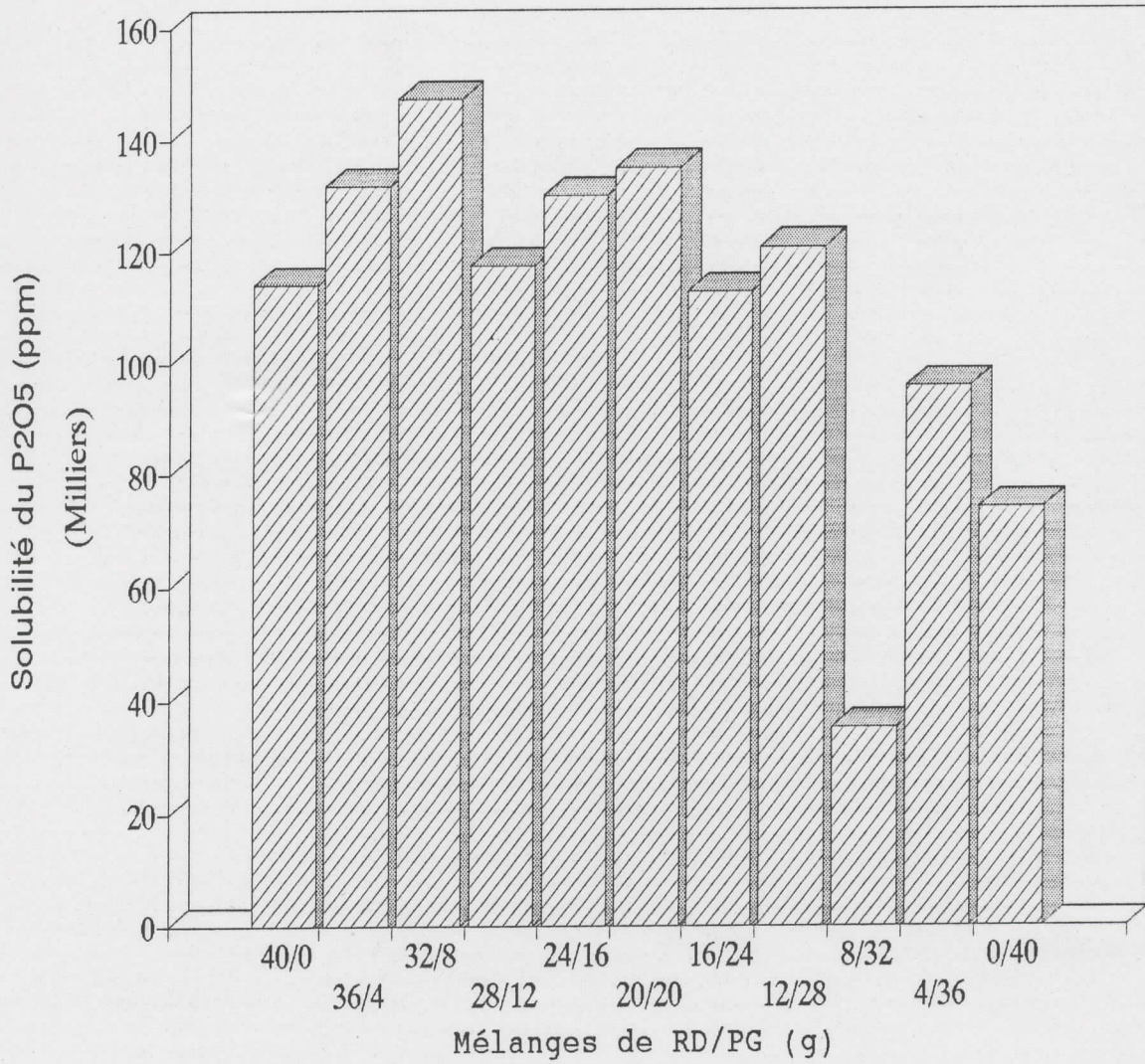
TABLEAU VIII.4 : - TEST NEWMAN-KEULS (seuil = 5%)

Doses de RD/P.G (g)	Moyennes P_2O_5 soluble (mg/l)	Groupes homogènes
16/ 24	29500,33	A
0/ 40	10111,33	B
12/ 28	7666,67	B
8/ 32	4972,67	B
4/ 36	3055,67	B
28/ 12	2306,00	B
24/ 16	2055,67	B
20/ 20	1917,00	B
36/ 4	1084,00	B
32/ 8	694,67	B
40/ 0	389,00	B

VIII.2.2-Solubilité dans l'acide citrique à 2 % :

La solubilité des mélanges R.D/P.G dans l'acide citrique est élevée, et ce quelque soit les proportions utilisées (fig.8.3). La meilleure solubilité est enregistrée pour le rapport 32/8 et la plus faible solubilité est donnée par le mélange 8/32 ; les autres traitements étant pratiquement égaux vis à vis de la solubilité dans l'acide citrique. Nous constatons que la proportion 32/8 est caractérisée par un pH de l'ordre de 7,5 et la dose 8/32 par un pH de l'ordre de 7,8, par conséquent la solubilité varie de façon marquée même pour de très faibles variations de pH. Nous notons aussi que le R.D seul a une meilleure solubilité que le P.G seul, ceci probablement à cause de la finesse des grains (TRUONG, 1988). Toutefois le mélange 32/8, donnant la meilleure solubilité, est situé dans la tranche des pH neutres, ce qui est en contradiction avec ce que rapporte GACHON (1982) qui dit que la solubilisation est plus importante quand le pH est acide.

L'analyse de la variance (tabl.VIII.5) montre un effet traitement non significatif sur la solubilité dans l'acide citrique.



**Figure 8.3 :- SOLUBILITE DU PHOSPHORE DANS L'ACIDE CITRIQUE
POUR LES MELANGES RD/PG.**

TABLEAU VIII.5 :- ANALYSE DE LA VARIANCE: Effet des mélanges R.D/P.G sur la solubilité du phosphore dans l'acide citrique à 2%

Source de variation	S.C.E	DDL	C.M	TEST F	PROB.	SIGN
Variation totale	688186714000	32	2130834820			
Facteur étudié	30068955000	10	3006894600	1,74	0,1348	N.S
Variation résiduelle	38117769000	22	1732625920			

TABLEAU VIII.6 : - MOYENNES $P_{25}O_5$ SOLUBLE (mg/l)

Doses de	RD/PG (g)	Moyennes
32	/8	147222,67
20	/20	134889,33
36	/4	131556,00
24	/16	129778,00
12	/28	120666,66
28	/12	117444,66
40	/0	114000,00
16	/24	112778,34
4	/36	99111,66
0	/40	74222,66
8	/32	35333,33

VIII.2.3-Solubilité dans le citrate d'ammonium La solubilité des mélanges R.D/P.G dans le citrate d'ammonium est plutôt faible, mis à part pour la proportion 0/40 où la solubilité est très élevée (fig.8.4).

L'analyse de variance (tabl.VIII .7) montre que le facteur mélange est très hautement significatif pour la solubilité dans le citrate d'ammonium neutre et que le traitement 0/40 est le meilleur vis à vis de la solubilité dans le citrate d'ammonium.

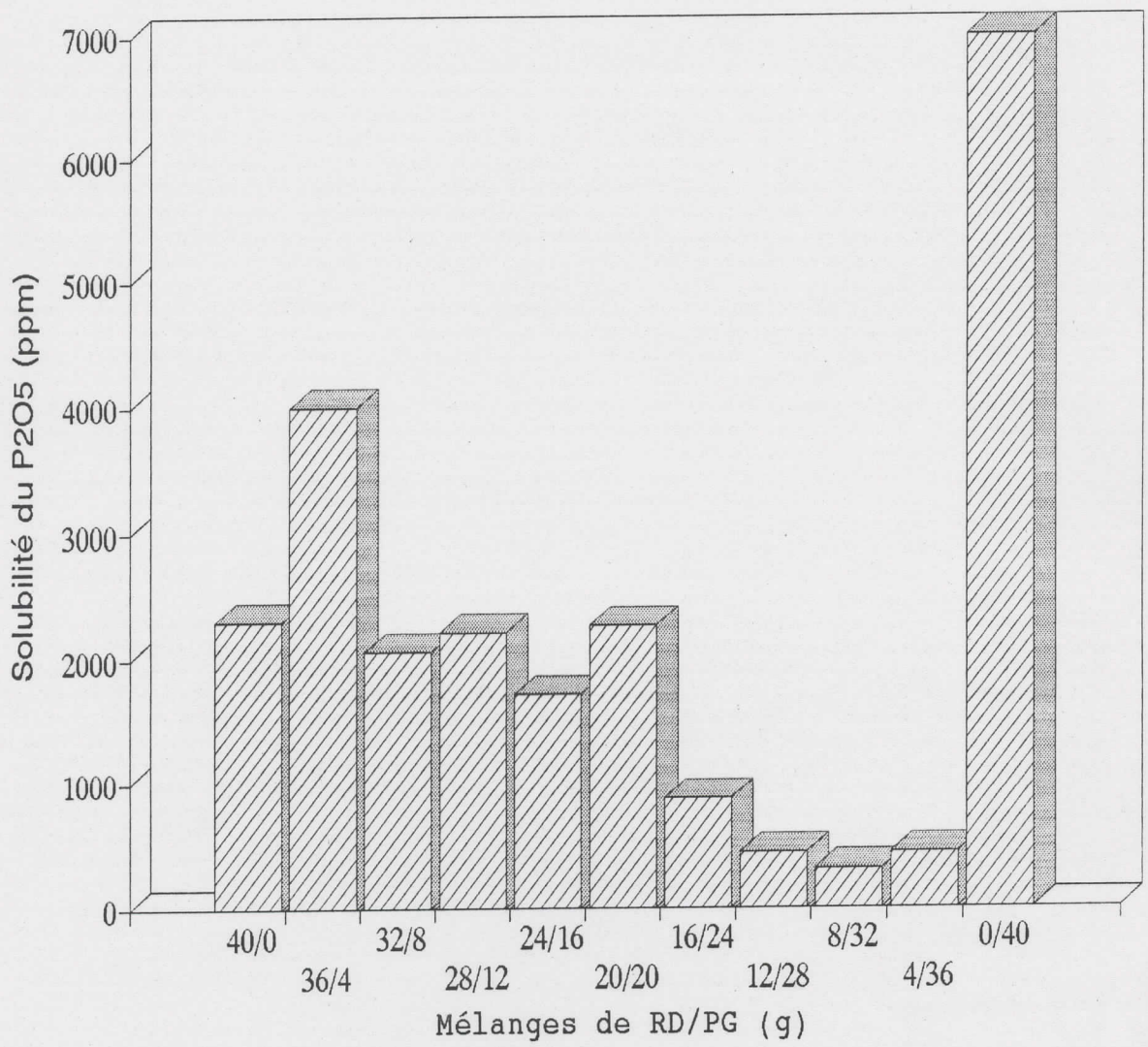


Figure 8.4 :- SOLUBILITE DU PHOSPHORE DANS LE CITRATE D'AMMONIUM POUR LES MELANGES RD/PG.

TABLEAU VIII.7 : - ANALYSE DE LA VARIANCE : Effet des mélanges R.D/P.G sur la solubilité dans le citrate d'ammonium neutre

Source de variation	S.C.E	DDL	C.M	TEST F	PROB.	SIGN
Variation totale	136231872	32	4257246			
Facteur étudié	114448192	10	11444819	11,56	0,0000	T.H.S
Variation résiduelle	21789680	22	990167,25			

TABLEAU VIII.8 : - TEST NEWMAN-KEULS (seuil = 5%)

Doses de RD/PG (g)	Moyennes P_2O_5 soluble (mg/l)	Groupes homogènes
0/40	7000,00	A
36/4	4000,00	B
40/0	2300,00	B C
20/20	2266,67	B C
28/12	2214,33	B C
32/8	2066,67	B C
24/16	1709,33	B C
16/24	866,67	C
4/36	433,33	C
12/28	433,33	C
8/32	300,00	C

VIII.3- Comparaison de la solubilité des mélanges RD/PG:

La figure (8.5) montre que la solubilité mesurée subit de fortes variations. Pour tous les traitements. Pour des teneurs en P_2O_5 supérieures ou égales à 15,25% la SE et la SCA sont confondues et tendent vers des valeurs inférieures à 10% .

Concernant la SER, celle-ci est plus élevée que la SCAR, mais pour des proportions en phosphore inférieures à 9,74% (fig. 8.6).

On peut donc penser que, la nature du solvant est le principal facteur régissant la solubilisation du P_2O_5 ; dans ce cas l'acide citrique constitue le meilleur solvant. Par contre pour les autres solvants de moindre efficacité, c'est plutôt la dose de PG qui entre dans le contrôle de la solubilisation.

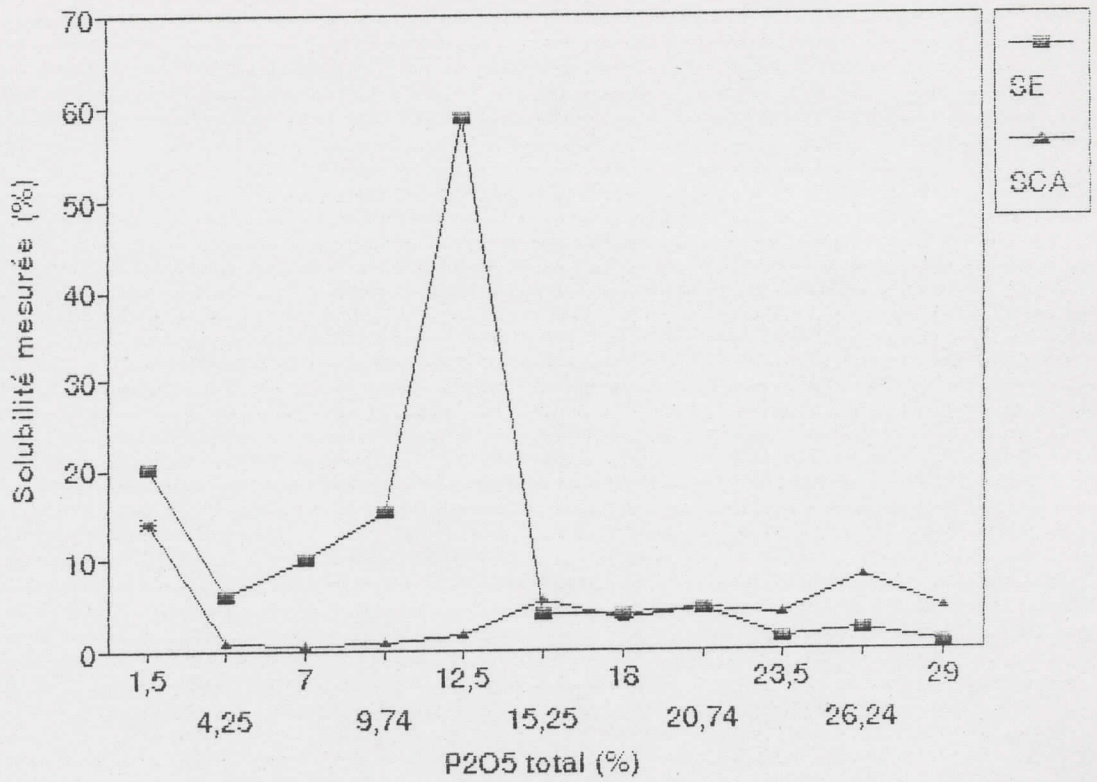


FIGURE 8.5 :- VARIATION DE LA SOLUBILITE MESUREE EN FONCTION DU PHOSPHORE TOTAL POUR LES MELANGES RD/PG.

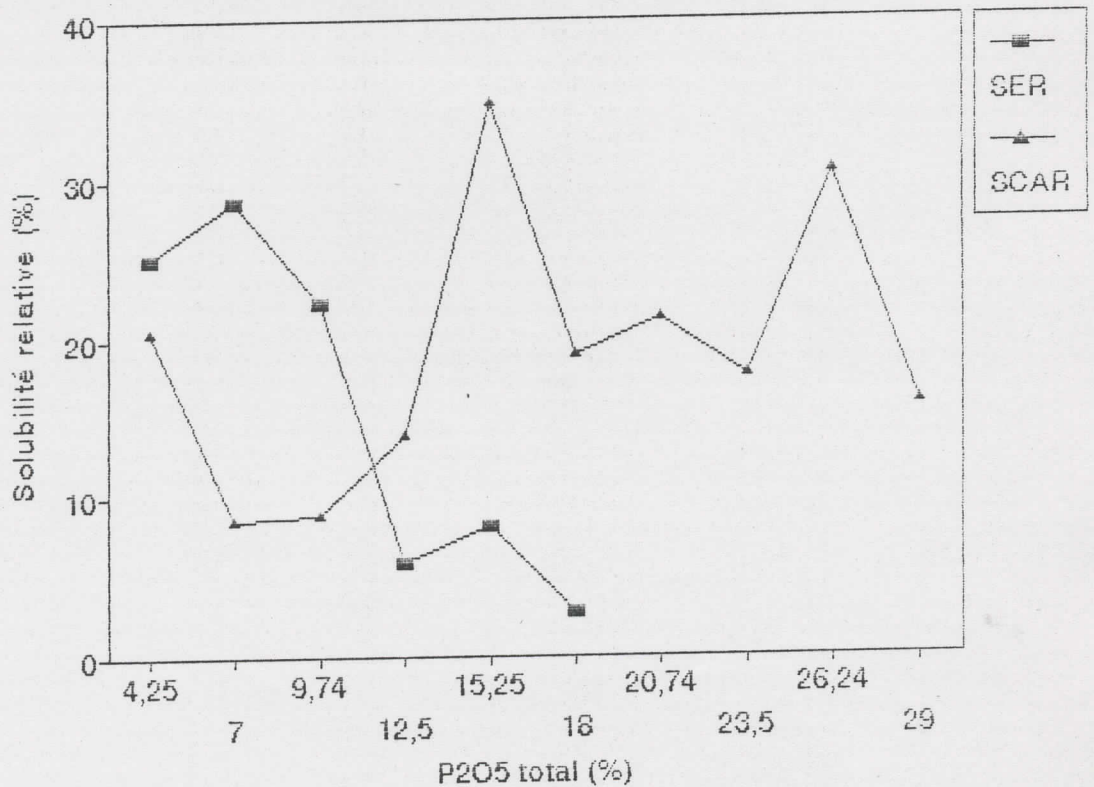


FIGURE 8.6 :- VARIATION DE LA SOLUBILITE RELATIVE EN FONCTION DU PHOSPHORE TOTAL POUR LES MELANGES RD/PG.

VIII.4 - Effet des mélanges sur la quantité de phosphore assimilable:

La quantité de phosphore assimilable (extrait par le bicarbonate de sodium) est extrêmement élevée puisqu'elle est bien supérieure à 56 p.p.m, notamment pour la proportion 24/16 ; le mélange 4/36 est celui qui fournit la teneur la moins forte en phosphore assimilable (fig.8.7).

L'analyse de variance (tabl.VIII.9) montre une très haute signification du facteur traitement sur la quantité de phosphore assimilable. Les proportions les plus performantes sont en relation avec un pH légèrement alcalin, ce qui ne confirme vraiment pas le fait de l'intervention du pH sur l'assimilabilité du phosphore comme il a été signalé par WHITE et TAYLOR (1977) et confirmé pour l'essai sur les mélanges P.N/P.G.

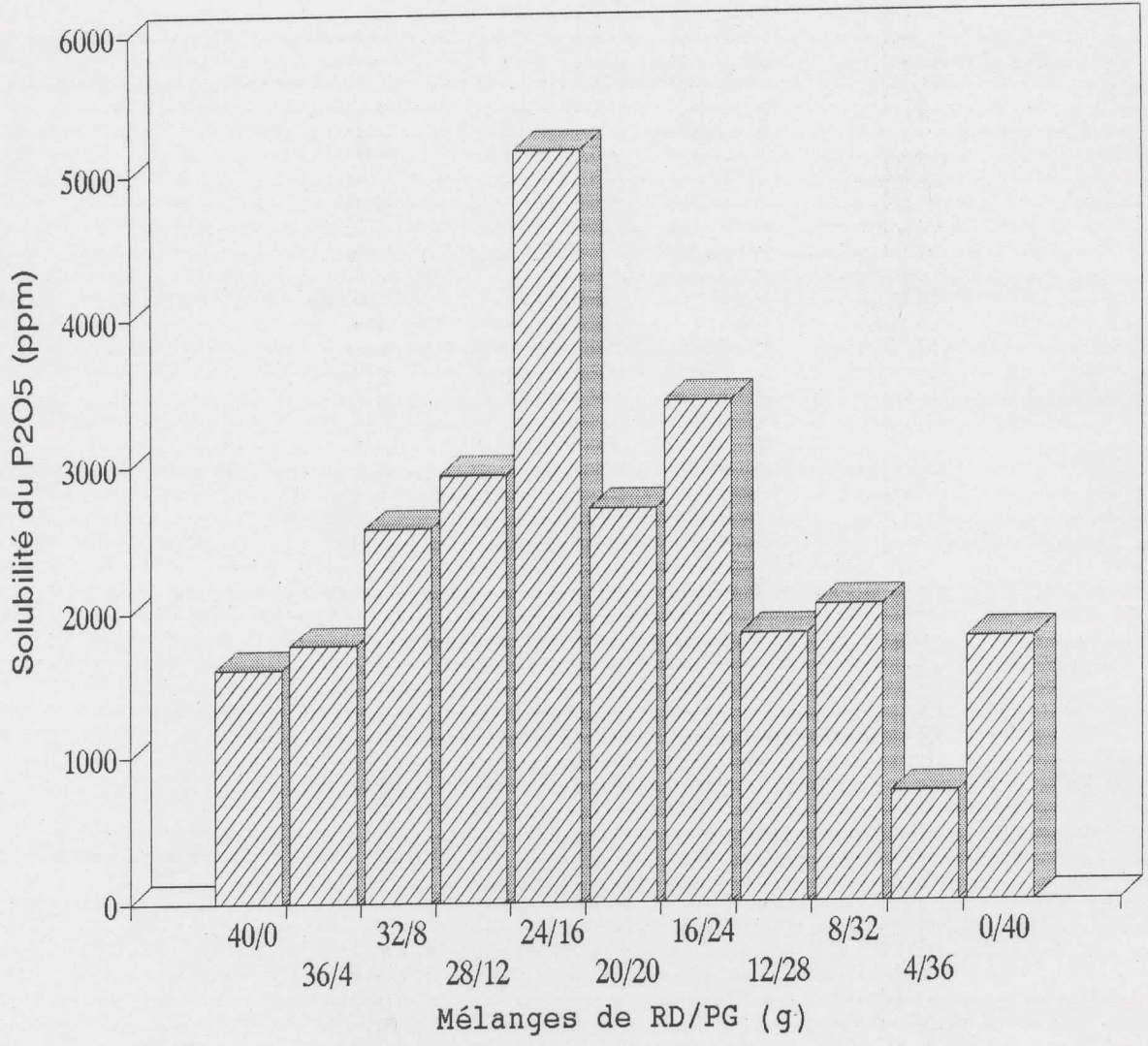


Figure 8.7 :- QUANTITE DE PHOSPHORE ASSIMILABLE POUR LES MELANGES RD/PG.

TABLEAU VIII.9 : ANALYSE DE LA VARIANCE: Effet des mélanges R.D/P.G sur la quantité de phosphore assimilable.

Source de variation	S.C.E	DDL	C.M	TEST F	PROB.	SIGN
Variation totale	5933,88	32	185,43			
Facteur étudié	4570,55	10	457,05	7,38	0,0001	T.H.S
Variation résiduelle	1363,33	22	61,87			

TABLEAU VIII.10 : - TEST NEWMAN-KEULS (seuil = 5%)

Doses de RD/P.G (g)	Moyennes P_2O_5 soluble (mg/l)	Groupes homogènes
24/16	51,67	A
20/20	37,00	B
16/24	34,33	B
28/12	29,33	B
32/8	25,67	B C
8/32	20,33	B C
12/28	18,33	B C
40/0	18,00	B C
4/36	17,67	B C
0/40	16,00	B C
36/4	7,33	C

Dans cette seconde partie de notre expérimentation nous avons obtenu les résultats suivants :

En ce qui concerne l'effet des mélanges entre refus dépoussiérés et phosphogypse il y'a une très haute signification, le mélange 40/0 donne le pH le plus élevé.

Quant à la solubilité dans les solvants, l'acide citrique présente la meilleure solubilité, notamment pour les quantités croissantes de phosphogypse ; l'eau offre les plus faibles solubilités.

Pour le phosphore assimilable, les mélanges les plus performants sont en relation avec un pH légèrement alcalin, aux alentours de 7,30-7,50.

Comparaison des pH des mélanges P.N/P.G et R.D/P.G

Il apparait que pour des quantités décroissantes de P.G, la variation du pH est plus importante pour les mélanges R.D/P.G que pour ceux de P.N/P.G. Par contre, pour des proportions supérieures ou égales à 16/24, ce sont les mélanges P.N/P.G qui voient leur pH plus élevé, mais la différence entre les traitements est très légère. Pour des mélanges pratiquement égaux (16/24, 20/20 et 24/16) le pH reste inchangé quel que soit les proportions.

Il ressort aussi de ces essais qu'en général le phosphate naturel donne une solubilité plus importante que les refus dépoussiérés pour les solvants eau et citrate d'ammonium neutre mais non pour l'acide citrique pour lequel, au contraire, ce sont les refus dépoussiérés qui sont plus solubles. Ceci contredit le fait que la taille de la particule est un critère déterminant de la solubilité (KOUIDER, 1974 ; LEYMONIE et WEBER, 1986 ; TRUONG, 1988) mais va dans le sens que la finesse de mouture est efficace dans les phosphates naturels (GACHON, 1982) et que la taille de la particule des phosphates montre moins de facteurs influençant l'efficacité de la fertilisation (SANDER et EGHBALL, 1988). En fait la finesse de mouture favorise la diffusion de l'acide phosphorique surtout dans les sols acides (KOUIDER, 1974).

CHAPITRE IX- RELATION SOL-PLANTE-TYPE DE FERTILISANT.

La troisième partie de l'expérimentation consiste en un test biologique. A cet effet nous mettons en place un essai, basé sur la méthode STANDFORD DE MENT, utilisant 2 types de sols : l'un calcaire (C) et l'autre non calcaire (S), 2 espèces végétales : une légumineuse (VESCE) et une graminée (ORGE) et 5 traitements : PN, PG, TSP, PN+PG (NG) et témoin (T).

Les teneurs moyennes obtenues dans nos essais sont comparées avec celles rapportées par HELLER (1981) et figurant dans le tableau IX.1.

Les teneurs obtenues en phosphore sont très faibles puisqu'elles n'excèdent pas les 0,12% de MS, notamment pour l'orge (fig.9.1).

IX.1 :ROLE DE LA NATURE DU VEGETAL :

IX.1.1.Sol calcaire :

a/ ORGE: Les teneurs en phosphore sont de l'ordre 0,02% de MS, celles ci sont donc très faibles. Le traitement PG est celui qui donne les moins faibles valeurs; par contre l'essai TSP est celui dont les valeurs en phosphore sont les plus faibles.

b/ VESCE: Les teneurs les plus élevées en P205 de l'essai témoin et les plus basses valeurs sont obtenues avec le TSP (figure 9.1).

c/ COMPARAISON ORGE/VESCE: On constate que, d'une manière générale, la vesce renferme plus de P205 que l'orge ; les meilleurs résultats étant donné par la vesce sur le traitement témoin et les plus faibles sur le TSP par la vesce toujours (Tabl.IX.2).

TABLEAU IX.1 : Composition minérale moyenne des végétaux
(HELLER, 1981)

Eléments minéraux	Quantité en % de matière sèche		
N	1	-	3
P	0,1	-	0,5
K	2	-	4
Ca	1	-	2
Mg	0,1	-	0,7
Na	0,3	-	0,4
Zn et Cu	10^{-3}	-	
Mn	10^{-3}	-	10^{-1}
F	10^{-7}	-	10^{-4}
S	0,1	-	0,6

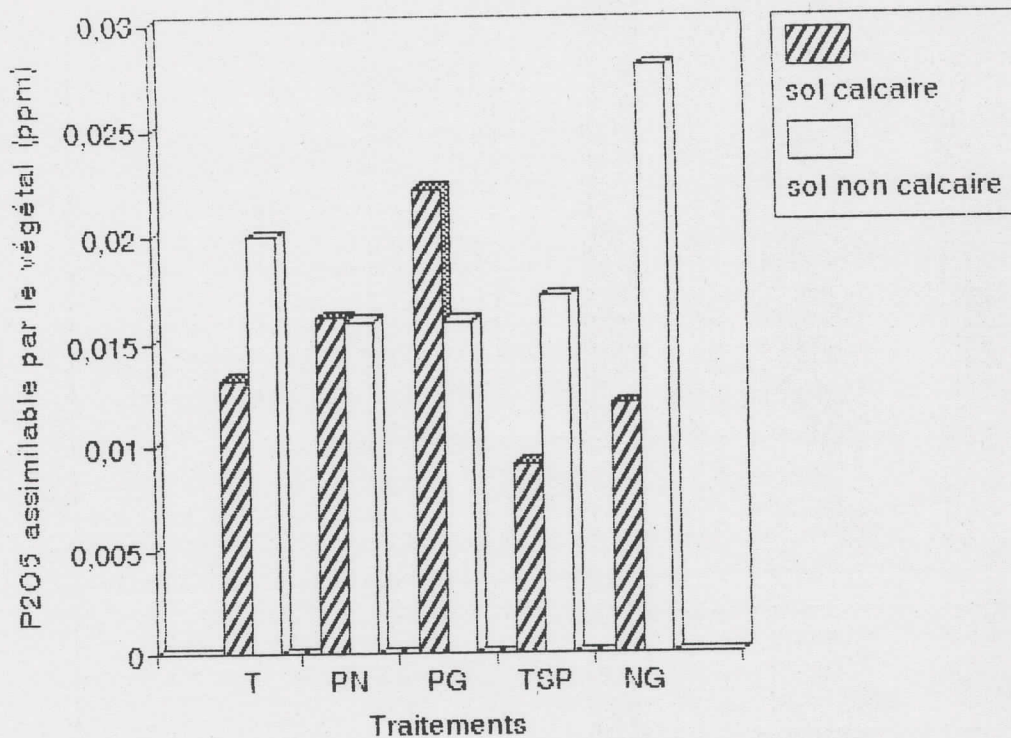


FIGURE 9.1 : - INFLUENCE DE DIFFERENTS TRAITEMENTS SUR LA TENEUR EN PHOSPHORE CHEZ LA VESCE.

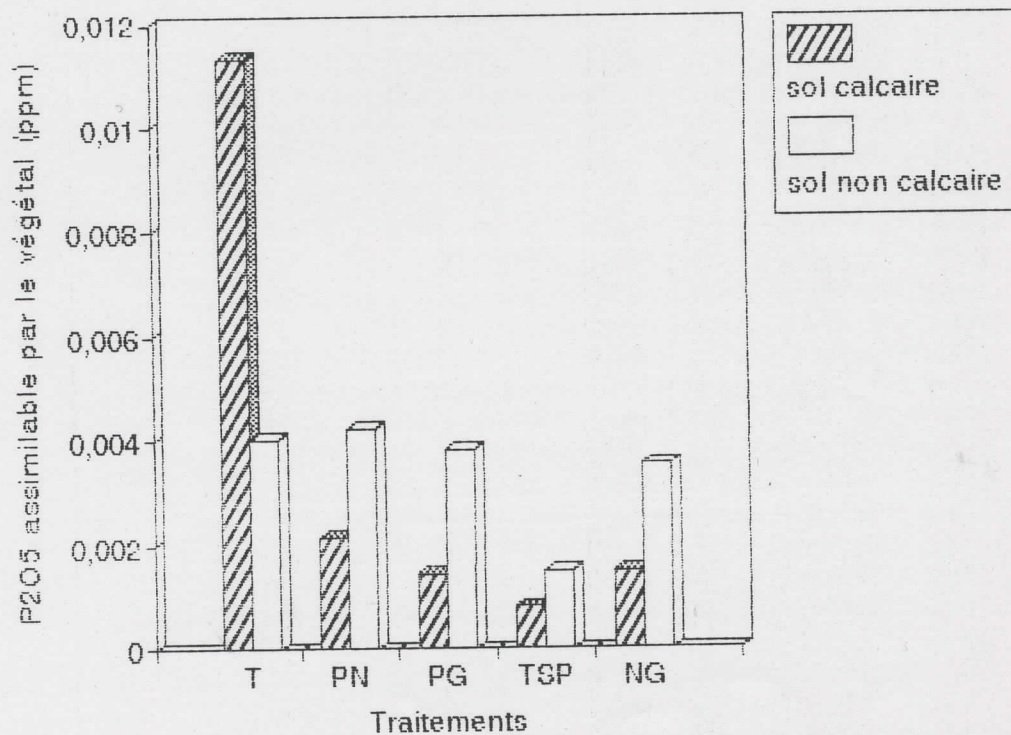


FIGURE 9.2 : - INFLUENCE DE DIFFERENTS TRAITEMENTS SUR LA TENEUR EN PHOSPHORE CHEZ L'ORGE.

IX.1.2.SOL NON CALCAIRE :

a/ **ORGE** : Les teneurs en phosphore sont de l'ordre de 0,03% de MS; les teneurs les plus élevées sont obtenues pour le traitement NG et les plus petites valeurs sont enregistrées pour le traitement PN.

b/ **VESCE** : Les teneurs en phosphore sont pratiquement les mêmes, quel que soit le traitement; elles sont de l'ordre de 0,04% de MS. Par contre, pour le traitement TSP les teneurs sont plus faibles, elles sont de l'ordre de 0,015% de MS.

c/ **COMPARAISON ORGE/VESCE** : D'une manière générale, les teneurs en P205 de la vesce sont plus élevées que pour l'orge pour les différents traitements effectués.

IX.2. ROLE DE LA NATURE DU SOL :

IX.2.1.ORGE :

a/ **Sol calcaire** : Les teneurs en phosphore dans l'orge sont de l'ordre de 0,02% de MS. Nous observons que celles ci sont les plus élevées pour le traitement PG et les plus faibles pour le traitement TSP.

b/ **Sol non calcaire** : Les teneurs en phosphore les plus élevées sont obtenues pour le traitement NG (0,03% de MS) et les plus basses sont données par les traitements PN et PG (0,018% de MS).

TABLEAU IX.2 : ANALYSE DE LA VARIANCE : Effet sol et végétal sur la quantité de phosphore assimilé.

Source de Var.	S.C.E	DDL	C.M	TEST F	PROB.	SIGN
Variation Totale	16375,76	99	165,41			
Variation Facteur Sol	6310,16	9	701,13	11,81	0,0000	T. H. S
Variation Facteur Végétal	1780,84	1	1780,84	30,00	0,0000	T. H. S
Variation Inter F1xF2	3535,96	9	392,88	6,62	0,0001	H. S
Variation Résiduelle	4748,80	80	59,36			

TABLEAU IX.3 : TEST NEWMAN-KEULS (seuil = 5%):Facteur sol.

TRAITEMENTS	MOYENNES (10^{-4})	GROUPES HOMOGENES	
SNG	32,10	A	
SPN	31,90	A	
ST	30,20	A	
SPG	27,20	A	
CPN	18,80	B	
CPG	18,30	B	
CT	16,50	B	C
STSP	16,20	B	C
CNG	13,40	B	C
CTSP	8,60		C

IX.2.2. VESCE :

a/ Sol calcaire : La figure 10.2 montre des teneurs en phosphore les moins faibles pour l'essai témoin et la plus basses pour le TSP.

b/ Sol non calcaire : Les quantités les plus élevées sont obtenues pour l'essai PN et les plus faibles pour l'essai TSP.

c/ Comparaison sol calcaire/sol non calcaire :

Les teneurs en P205 sont moins faibles sur sol non calcaire que sur sol calcaire. L'analyse de la variance (Tabl.IX.2) qu'il y'a un effet très hautement significatif du facteur sol avec une dominance du sol non calcaire.

Les valeurs les plus élevées sont obtenues par le témoin calcaire. On constate une légère supériorité de la vesce sur sol non calcaire.

IX.3.SYNTHESE ET DISCUSSION DES RESULTATS :

La valeur la plus élevée en P205 est observée sur sol calcaire et / ou non calcaire, mais toujours pour la vesce avec une dominance de l'essai témoin (C TEMOIN) par rapport à l'essai (CPN).

De façon générale, un effet positif du calcaire sur la solubilisation du phosphore total est noté. Cette même observation est rapportée par SCHWAB (1989). De même, ADEPOJU et al. (1982) supposent que le phosphore disponible pour le végétal est étroitement lié non seulement à la texture et au pH, mais aussi à la teneur en calcium. Dans ce sens, HALFAOUI (1988) affirme que le calcium stimule l'action des micro-organismes dans

la solubilisation des phosphates contenus dans le sol.

D'autre part, les faibles teneurs en phosphore des sols calcaires dans les différents essais, seraient dues à une rétrogradation de la quantité d'acide phosphorique ajouté (GACHON, 1982). Concernant la quantité élevée retrouvée dans la vesce, elle est à relier à la forte assimilation de l'azote favorisant la diminution du pH, lequel avantagerait la solubilisation des phosphates peu solubles (DAOUD, 1988).

Quant à l'interaction sol x végétal, elle est très hautement significative ; notamment en sol non calcaire en présence de vesce.

D'autre part, comme l'indique la figure (9.3) les fertilisants utilisés (PN, PG et NG) n'exercent pas une grande influence sur l'assimilation du phosphore chez la vesce, malgré une légère augmentation en sol non calcaire. Par contre, chez l'orge, le P205 est mieux assimilé. Si toutefois pour le PN l'effet sol n'intervient, pour le PG, l'assimilation est meilleure en sol calcaire.

Enfin nous remarquons que le traitement NG entraîne une assimilation plus accrue sur sol non calcaire et beaucoup plus faible en sol calcaire. Ceci peut s'expliquer par la nature acide du sol et sa richesse en soufre, comme l'indiquent (TRUONG, 1985 ; SIFAoui, 1988).

TABLEAU IX.4 : TEST NEWMAN-KEULS (Seuil = 5%) : Facteur végétal.

VEGETAL	MOYENNES (10^{-4})	GROUPES HOMOGENES
VESCE	25,54	A
ORGE	17,10	B

TABLEAU IX.5 : TEST NEWMAN-KEULS (Seuil = 5 %) :

Intéraction sol x végétation

FACTEUR ETUDIE	MOYENNES (10^{-4})	GROUPES HOMOGENES
SPN (VESCE)	47,80	A
ST (VESCE)	40,40	A B
SPG (VESCE)	38,40	A B
SNG (VESCE)	35,60	A B
SNG (ORGE)	28,60	B C
CPG (ORGE)	22,20	C D
CPN (VESCE)	21,40	C D
ST (ORGE)	20,00	C D
CT (VESCE)	19,80	C D
STSP (ORGE)	17,60	C D
CPN (ORGE)	16,20	C D
SPG (ORGE)	16,00	C D
SPN (ORGE)	16,00	C D
STSP (VESCE)	14,80	C D
CNG (VESCE)	14,80	C D
CPG (VESCE)	14,40	C D
CT (ORGE)	13,20	C D
CNG (ORGE)	12,00	C D
CTSP (ORGE)	9,20	D
CTSP (VESCE)	8,00	D

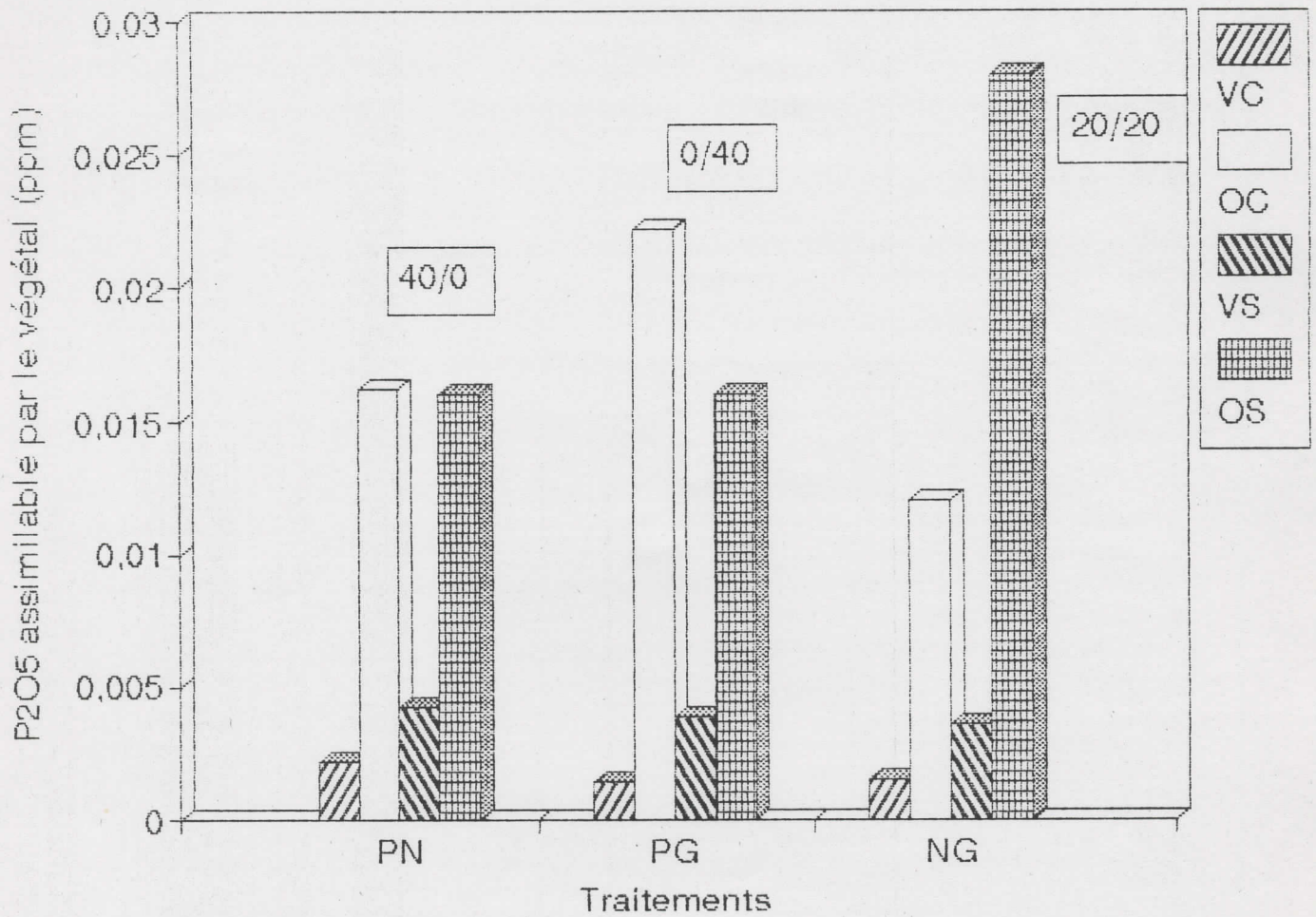


FIGURE 9.3 - QUANTITE DE PHOSPHORE ASSIMILE EN RELATION AVEC LA NATURE DU SOL, DU FERTILISANT ET DU VEGETAL UTILISES.

IX.4 EFFICACITE AGRONOMIQUE RELATIVE (EAR) :

La EAR est calculée d'après la formule suivante:

$$EAR = \frac{\text{rendement de la forme X} - \text{rendement du témoin}}{\text{rendement TSP} - \text{rendement du témoin}} \cdot 100$$

Les valeurs obtenues sont données par la figure

9.4. A titre comparatif nous donnons des valeurs de EAR (AMAR, 1988):

EAR (%)	APPRECIATION DE LA SOLUBILITE
> 90	élevée (E)
90-70	moyenne (M)
70-30	basse (B)
< 30	très basse (TB)

Pour les traitements PN (phosphates naturels), PG (phosphogypse) et NG (mélange entre PN et PG), un calcul de la RAE est effectué et a permis les constatations suivantes:

IX.4.1-ROLE DE LA NATURE DU SOL :

4.1.1.Sol calcaire :

a)Orge : L' analyse de la figure 9.4 montre de façon générale que:

- le PN a une EAR basse.
- le PG a EAR moyenne.
- le mélange NG a une EAR moyenne, plus élevée

cependant que celle du PG seul.

b)Vesce :

-le PN et le PG ont tout deux une EAR basse, celle du PN étant légèrement plus élevée.

- le mélange NG a une EAR moyenne.

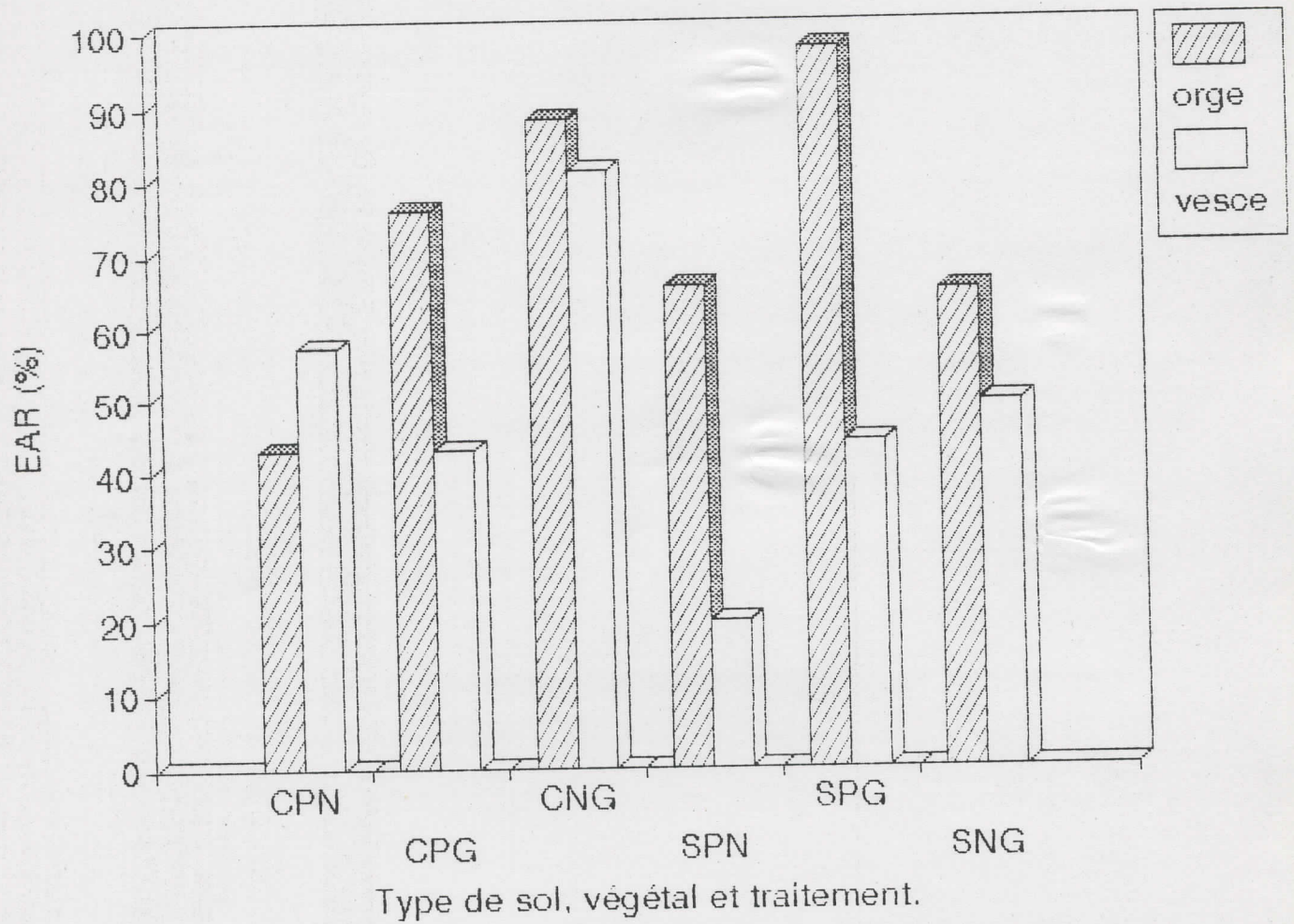


FIGURE 9.4 :- VARIATION DE L'EFFICACITE AGRONOMIQUE RELATIVE CHEZ L'ORGE ET LA VESCE.

c) Comparaison orge / vesce : vis à vis des traitements PG et mélange NG, l'efficacité agronomique relative est plus importante chez l'orge que chez la vesce, au contraire pour le PN sa EAR semble légèrement supérieure chez la vesce que chez l'orge.

4.1.2. Sol non calcaire :

a) Orge : alors que les EAR des PN et NG sont basses et équivalentes, celle du PG est élevée.

b) Vesce : la EAR du PN est très basse et celles du PG et du mélange NG sont basses.

c) Comparaison orge/vesce : bien que basses les EAR des traitements PN, PG et NG sont plus importantes chez l'orge que chez la vesce.

IX.4.2-ROLE DE LA NATURE DU VEGETAL :

4.2.1. Orge :

a) Sol calcaire : Les EAR du PG et du mélange NG sont moyennes, par contre celle du PN est basse.

b) Sol non calcaire : Les EAR du PN et du mélange NG sont équivalentes et basses, alors que celle du PG est élevée.

c) Comparaison sol calcaire/ sol non calcaire: les efficacités agronomiques relatives sont plus importantes en sol non calcaire pour le fertilisant PG , par contre, pour le mélange NG c'est le sol calcaire qui présente une meilleure EAR.

4.2.2 Vesce :

a) Sol calcaire : Les valeurs de EAR sont basses pour le PN et Le PG, avec une légère supériorité du PN.

Le mélange NG a une EAR moyenne.

b) sol non calcaire : La EAR est très basse pour le PN et basse pour les fertilisants PG et NG.

c) Comparaison sol calcaire/ sol non calcaire : D'une manière générale la EAR des fertilisants PN, PG et NG est toujours plus élevée en sol calcaire, notamment en ce qui concerne le PN.

Par ailleurs, l'analyse de la variance (tabl.IX.6) montre aucune signification vis à vis du facteur sol, alors que les facteurs végétal et traitement sont respectivement très hautement et hautement significatifs.

En outre, les interactions sol. végétal, sol. traitement et végétaltraitement sont significatives à hautement significatives. Quant à l'interaction de ces trois facteurs, il n'apparaît aucune signification.

L'efficacité agronomique relative semble être moyenne à basse pour l'ensemble des essais effectués. elle varie de façon significative selon le type de fertilisant ajouté au sol : ainsi le mélange NG apparaît être plus efficace que le PN ou le PG seuls. Ce dernier présente quand même une EAR supérieure à celle du PN. Ceci peut s'expliquer par la présence du soufre qui améliore l'efficacité des phosphates, d'une part (SIFAOU, 1988) et par l'efficacité des phosphates naturels, principalement en sol acide, d'autre part (TRUONG, 1985).

TABLEAU IX.6 : ANALYSE DE LA VARIANCE : Efficacité Agronomique Relative

Source de variation	SCE	DDL	CM	Test F	Proba.	Sign.
Variation Totale	22116,87	35	631,91			
Variation F1 Facteur Sol	581,29	1	581,29	2,58	0,1173	NS
Variation F2 Facteur Végétal	4998,02	1	4998,02	22,22	0,0001	THS
Variation F3 Facteur Traitement	3969,67	2	1984,83	8,81	0,0014	HS
Variation Interaction F1.2	2018,41	1	2018,41	8,97	0,0062	HS
Variation Interaction F1.3	2267,62	2	1133,81	5,04	0,0147	S
Variation Interaction F2.3	1808,21	2	904,10	4,02	0,0307	S
Variation Interaction F1.2.3	1080,75	2	540,38	2,40	0,1102	NS
Variation Résiduelle	5398,90	24	224,95			

TABLEAU IX.7 : TEST NEWMAN-KEULS (seuil = 5%) : Facteur Végétal.

Végétal	Moyennes (%)	Groupes homogènes
Orge	72,56	A
Vesce	48,99	B

TABLEAU IX.8 : TEST NEWMAN-KEULS (seuil = 5%) : Facteur Traitement.

Traitement	Moyennes (%)	Groupes homogènes
NG	70,89	A
PG	65,13	A
PN	46,31	B

TABLEAU IX.9 : TEST NEWMAN-KEULS (seuil = 5%) : Facteur Inter. sol x végétal.

Traitement	Moyennes (%)	Groupes homogènes
S (orge)	76,03	A
C (orge)	69,09	A
C (vesce)	60,50	A
S (vesce)	37,49	B

TABLEAU IX.10: TEST NEWMAN-KEULS (seuil = 5%) : Facteur Inter. solxtraitement.

Traitement	Moyennes (%)	Groupes homogènes
C NG	84,72	A
S PG	70,73	A B
C PG	59,53	B C
S NG	57,05	B C
C PN	50,13	B C
S PN	42,49	C

TABLEAU IX.11: TEST NEWMAN-KEULS (seuil = 5%) : Facteur Inter. végétal x traitement.

Traitement	Moyennes (%)	Groupes homogènes
PG (orge)	86,86	A
NG (orge)	76,63	A B
NG (vesce)	65,14	B C
PN (orge)	54,19	C D
PG (vesce)	43,40	D
PN (vesce)	38,43	D

CHAPITRE X : INFLUENCE DE LA NATURE DU FERTILISANT PHOSPHATE SUR
LA NUTRITION DES CULTURES EN ELEMENTS NUTRITIFS
AUTRES QUE LE PHOSPHORE.

X.1- L'AZOTE :

X.1.1- ROLE DE LA NATURE DU SOL :

1.1.1- Sol calcaire :

a) Orge : Les teneurs en azote sont faibles pour les différents traitements par référence aux normes données par HELLER (1981) et figurant dans le tableau X.1; cependant le TSP est celui qui présente les valeurs en azote les plus élevées (fig.10.1).

b) Vesce : Pour cet essai les teneurs en azote sont faibles aussi, le meilleur résultat étant observé pour le traitement au PN (fig.10.2).

c) Comparaison orge/vesce : La quantité d'azote dans la vesce est supérieure à celle obtenue dans l'orge.

1.1.2- Sol non calcaire :

a) Orge : Les teneurs en azote sont faibles et pratiquement identiques pour les différents traitements.

b) Vesce : Les teneurs en azote sont faibles, elles n'excèdent pas les 0,9% de MS. Les traitements de PG et de NG sont ceux qui présentent les meilleures teneurs en azote.

c) Comparaison orge/vesce : Les teneurs en azote semblent plus élevées dans la vesce que dans l'orge.

L'analyse de la variance (tabl.X.1) fait apparaitre que le facteur végétal n'a aucune différence significative, et ce pour les différents traitements utilisés.

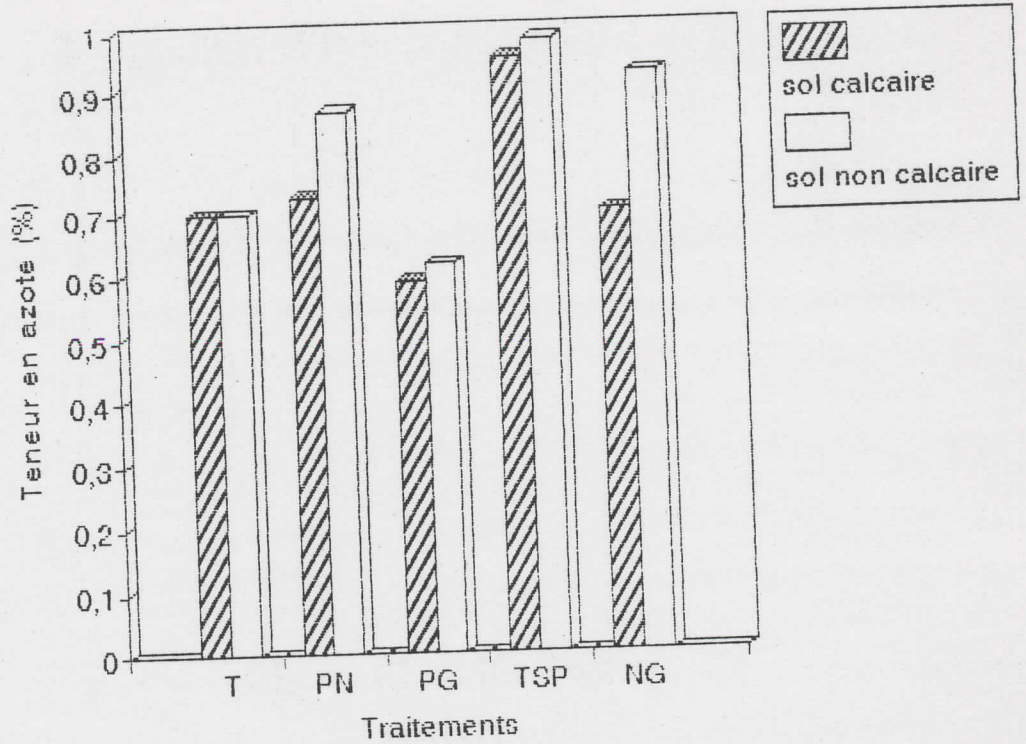


FIGURE 10.1 :- INFLUENCE DES DIFFERENTS TRAITEMENTS SUR LA TENEUR EN AZOTE CHEZ L'ORGE.

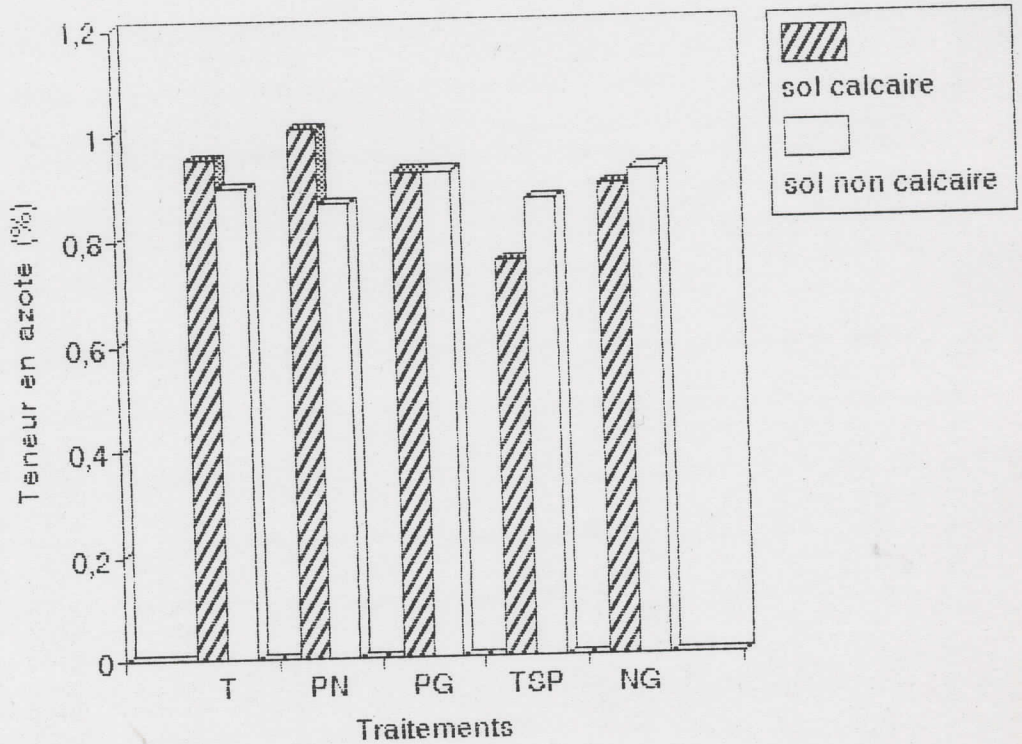


FIGURE 10.2 :- INFLUENCE DES DIFFERENTS TRAITEMENTS SUR LA TENEUR EN AZOTE CHEZ LA VESCE.

X.1.2. Role de la nature du végétal :

1.2.1. Orge :

a) Sol calcaire : Les teneurs en azote varient entre 0,6 (PG) et 0,95% de MS (TSP).

b) Sol non calcaire : les valeurs de l'azote oscillent aussi entre 0,6 et 0,98% de MS respectivement pour les traitements PG et TSP.

c) Comparaison sol calcaire/sol non calcaire :

Pour Les traitements PN, PG et NG les teneurs en azote sont plus importantes en sol non calcaire. Les autres essais ont des valeurs identiques pour les deux types de sol.

1.2.2- Vesce :

a) Sol calcaire : Les teneurs en azote varient entre 0,76 et 1,01% de MS. Celles ci sont faibles comparées à celles données par HELLER (1981).

b) Sol non calcaire : Les teneurs en azote sont comprises entre 0,87 (PN et TSP) et 0,92% de MS (NG).

c) Comparaison sol calcaire / sol non calcaire :

Une légère supériorité des teneurs en azote dans les sols calcaires est observée, principalement avec le traitement de PN.

La quantité d'azote prélevée tant par l'orge que par la vesce reste faible puisqu'elle est en deça des normes données en bibliographie (HELLER, 1981) et ce quel que soit le traitement et le sol utilisés.

Le calcaire du sol ne semble pas avoir d'effet positif sur l'alimentation azotée des cultures étudiées, de même que la nature du fertilisant (PN, PG, TSP ou NG) n'a aucun impact

sur la nutrition azotée de la vesce et de l'orge comme il est confirmé par l'analyse statistique (tabl.X.1). On signale par contre l'effet positif de l'apport azoté sur le contenu phosphaté (KAMPRATH, 1987).

X.2.-LE POTASSIUM :

X.2.1- Role de la nature du végétal :

2.1.1- Sol calcaire :

a) Orge : La figure 10.3 montre que l'orge a de faibles teneurs en potassium. La meilleure valeur est donnée par le traitement PG et la plus faible par le TSP.

b) Vesce : Les valeurs en potassium varient entre 0,45 et 0,8% de MS pour les traitements au PN et au NG respectivement. (figure 10.4)

c) Comparaison orge/vesce : L'orge présente une légère supériorité dans l'assimilation du potassium par rapport à la vesce, même si les teneurs restent faibles pour les deux espèces.

2.1.2- Sol non calcaire :

a) Orge : Les meilleures teneurs en potassium sont observées sur l'essai PN et les plus faibles valeurs sont enregistrées par le traitement au NG.

b) Vesce : Les teneurs en K sont faibles, elles ne dépassent pas les 0,6% de MS. Les meilleurs résultats sont obtenus par les traitements PN et T, les plus faibles valeurs sont données par le traitement au TSP.

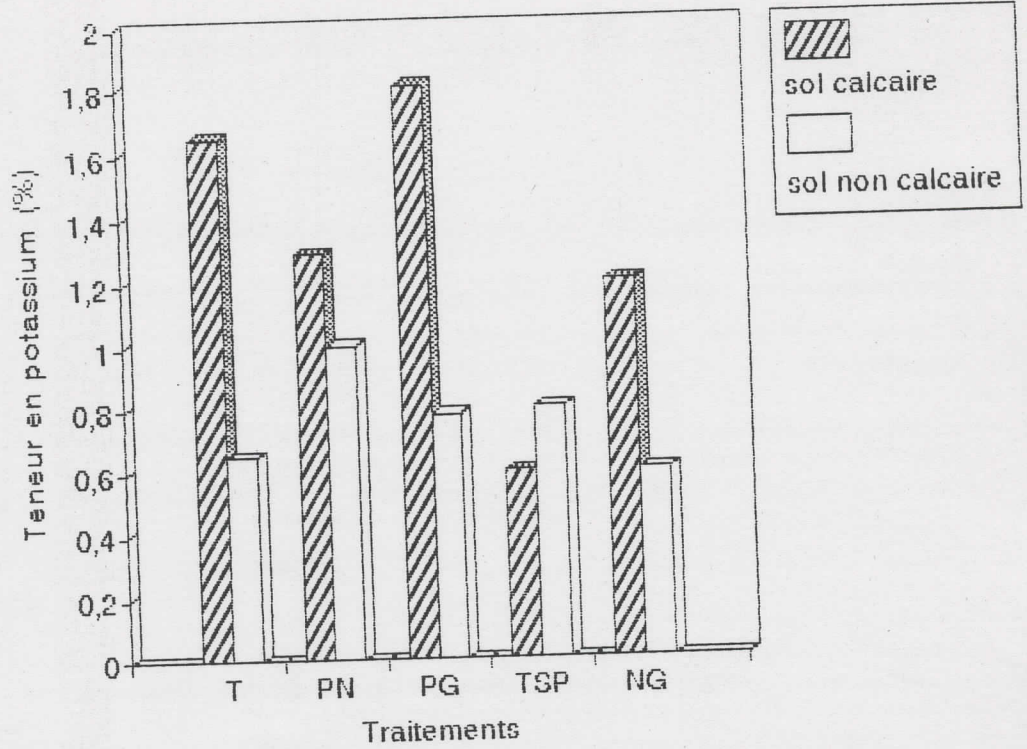


FIGURE 10.3 :- INFLUENCE DES DIFFERENTS TRAITEMENTS SUR LA TENEUR EN POTASSIUM CHEZ L'ORGE.

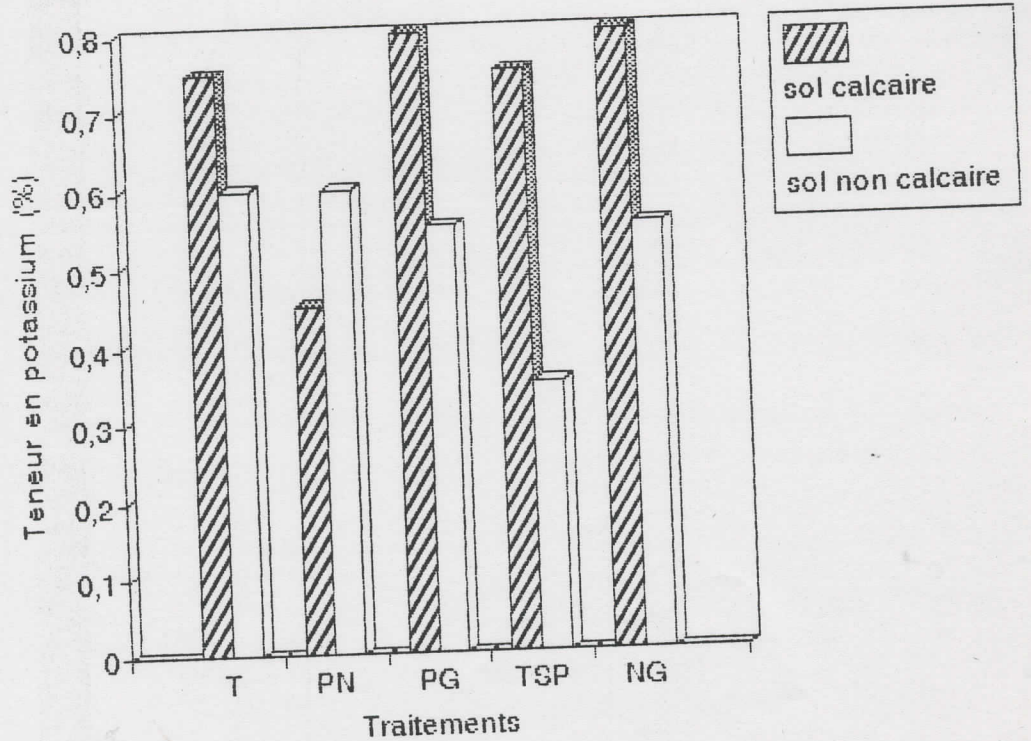


FIGURE 10.4 :- INFLUENCE DES DIFFERENTS TRAITEMENTS SUR LA TENEUR EN POTASSIUM CHEZ LA VESCE.

c) Comparaison orge / vesce : En sol non calcaire les teneurs en K sont plus importantes dans les tissus de l'orge que dans ceux de la vesce. Pour les essais T et NG la différence est peu marquée, par contre pour les autres traitements l'assimilation du K est différente, celle ci étant plus accrue dans les tissus de l'orge.

L'analyse de la variance (tabl.X.2) montre que le facteur végétal est hautement significatif sur l'assimilation du K et place ^{la Vesce} l'orge en première place devant la vesce.

X.2.2- Role de la nature du sol :

2.2.1- Orge :

a) Sol calcaire : La plus grande valeur est donnée par l'essai PG et la plus faible teneur est obtenue par l'essai TSP.

b) Sol non calcaire : L'orge présente des valeurs qui oscillent entre 0,6 et 1% de MS, pour respectivement les essais sans traitement et avec le traitement au PN.

c) Comparaison sol calcaire / sol non calcaire : Les teneurs en K des tissus végétaux sont plus élevées en sol calcaire qu'en sol non calcaire.

2.2.2- Vesce :

a) Sol calcaire : Les teneurs en K de la vesce sont pratiquement les mêmes pour les différents essais, sauf pour le traitement PN où la valeur du K est moindre.

b) Sol non calcaire : Les valeurs sont de l'ordre de 0,35% de MS (TSP), elles atteignent les 0,60% de MS pour les autres traitements.

c) Comparaison sol calcaire / sol non calcaire : Les teneurs en K de la vesce restent faibles surtout en sol non calcaire.

L'analyse de la variance montre que le facteur sol a un effet significatif et fait apparaitre une dominance du sol calcaire particulièrement en présence de PG (tabl.X.2)

Notons par ailleurs que l'interaction sol x végétal est non significative.

Il semble que les fertilisants phosphatés, notamment le phosphogypse et le mélange (phosphate naturel - phosphogypse) favorisent l'assimilation du potassium. Ceci est probablement dû à l'interaction de synergie entre P et K ainsi que l'antagonisme entre Ca et K , d'une part et l'antogonisme entre le calcium et le phosphore comme il est signalé par DIEHL (1975). Ce même auteur rapporte que le potassium diffuse très faiblement, ce qui pourrait expliquer les faibles teneurs dans les tissus végétaux.

TABLEAU X .2 : ANALYSE DE LA VARIANCE : Effet sol et végétal sur la quantité de Potassium prélevée par les cultures.

Source de Var.	S.C.E	DDL	C.M	TEST F	PROB.	SIGN
Variation Totale	275359,59	99	2781,41			
Variation Facteur Sol	47638,97	9	5293,22	2,51	0,0138	S
Variation Facteur Végétal	24666,69	1	24664,69	11,71	0,0011	H.S
Variation Inter F ₁ F ₂	34515,95	9	3835,10	1,82	0,0768	N.S
Variation Résiduelle	168540,00	80	2106,75			

TABLEAU X .3 : TEST NEWMAN KEULS (seuil = 5%) : Facteur sol.

TRAITEMENTS	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES	
CPG	13,05	A	
C(PN + PG)	10,00	A	B
CPN	8,74	A	B
SPN	8,00	A	B
CTSP	6,75		B
C(TEMOIN)	6,75		B
SPG	6,66		B
S(TEMOIN)	6,25		B
S(PN + PG)	5,75		B
STSP	5,75		B

TABLEAU X .4 : TEST NEWMAN KEULS (seuil = 5%) : Facteur végétal.

VEGETAL	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES	
VESCE	9,34	A	
ORGE	6,20		B

X.3- LE CALCIUM :

X.3.1. Role de la nature du végétal :

3.1.1. Sol calcaire :

a) Orge : La figure 10.5 montre que les teneurs en Ca varient entre 0,47% et 0,85% de MS, ce qui est faible. Les teneurs les plus élevées sont enregistrées par le témoin et les plus faibles par le traitement PG.

b) Vesce : Les teneurs en Ca restent faibles puisqu'elles varient entre 0,5 et 0,8% de MS respectivement pour les traitements PN et NG (fig.10.6).

c) Comparaison orge/vesce : L'orge présente une meilleure assimilation du calcium pour les essais T et PN. Par contre, pour les autres traitements c'est la vesce qui renferme plus de calcium dans ses tissus.

3.1.2- Sol non calcaire :

a) Orge : Les teneurs les plus élevées sont observées pour les traitements T et PN et les plus faibles se retrouvent dans l'essai NG.

b) Vesce : Les teneurs en Ca oscillent entre 0,68 et 0,75% de MS respectivement pour les essais PN et TSP.

c) Comparaison orge/vesce : On observe des différences entre les teneurs en Ca assez marquées pour les traitements TSP et NG ; ces différences sont faibles pour les essais T et PN, quant à l'essai PG, il n'ya pas de différence de quantité de calcium des tissus pour les deux végétaux étudiés.

L'analyse de la variance (tabl.X.5) montre que le facteur végétal est très hautement significatif, les teneurs

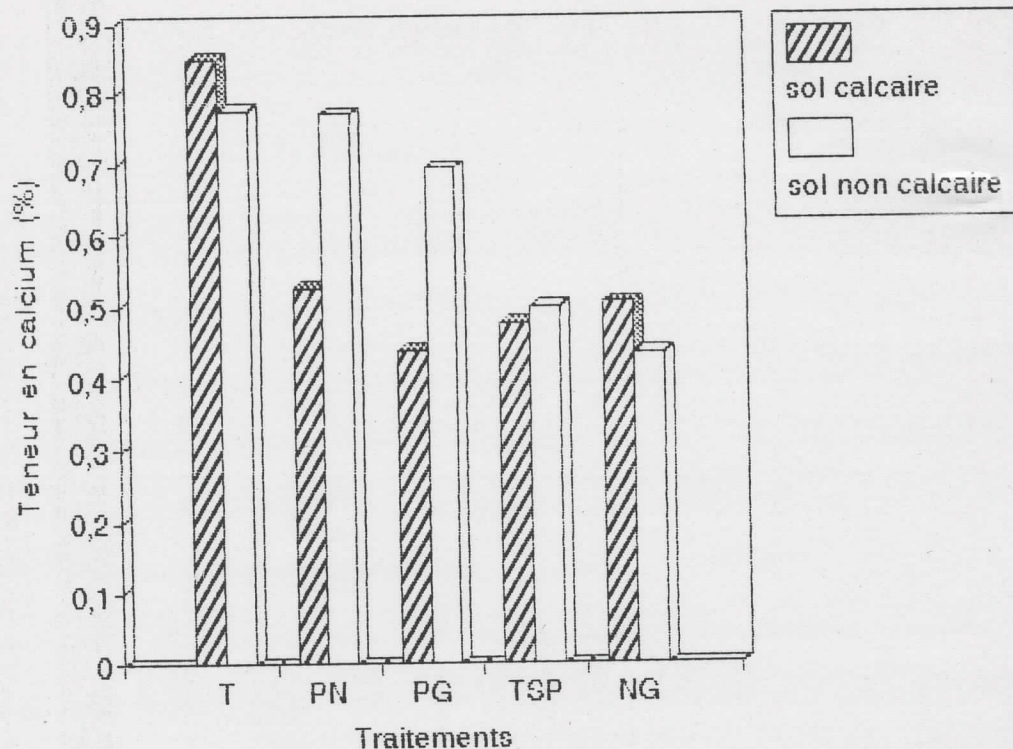


FIGURE 10.5 :- INFLUENCE DES DIFFERENTS TRAITEMENTS SUR LA TENEUR EN CALCIUM CHEZ L'ORGE.

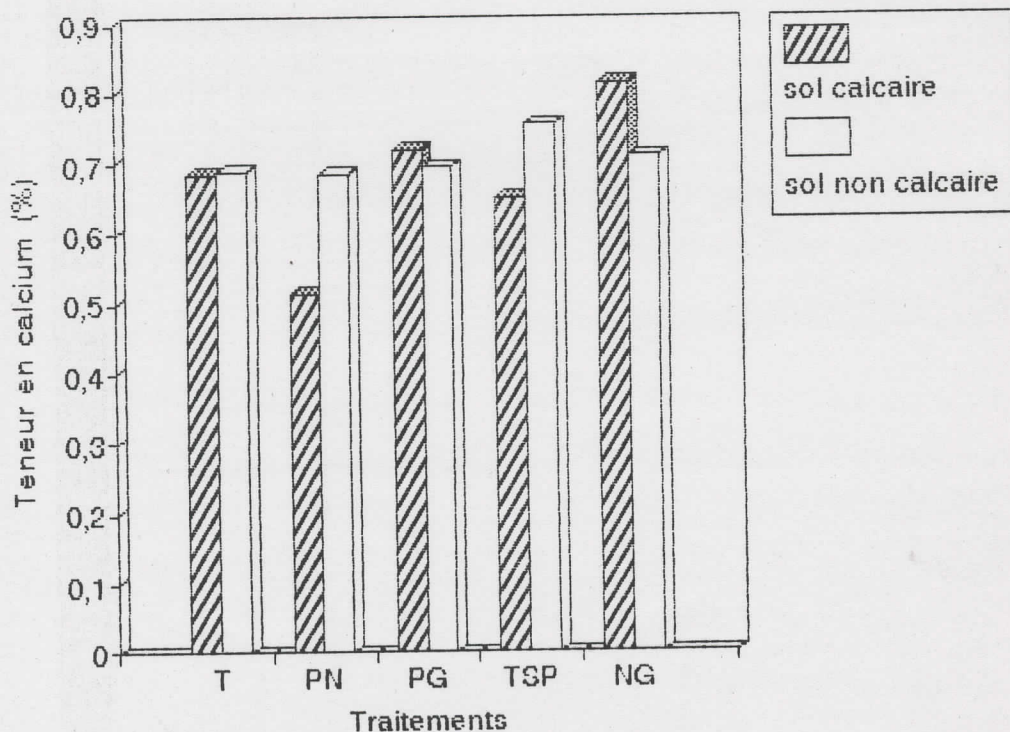


FIGURE 10.6 :- INFLUENCE DES DIFFERENTS TRAITEMENTS SUR LA TENEUR EN CALCIUM CHEZ LA VESCE.

TABLEAU X .5 : ANALYSE DE LA VARIANCE : Effet sol et végétal sur la quantité de Calcium prélevée par les cultures.

Source de Var.	S.C.E	DDL	C.M	TEST F	PROB.	SIGN
Variation Totale	282427520	99	2852803,2			
Variation Facteur Sol	50490016	1	5610002,0	3,16	0,0026	HS
Variation Facteur Végétal	30802528	9	30802528	17,37	0,0001	THS
Variation Inter F1xF2	59284976	9	6587219,5	3,72	0,0007	THS
Variation Résiduelle	141850000	80	177312,5			

TABLEAU X .6 : TEST NEWMAN KEULS (seuil = 5%): Facteur sol.

TRAITEMENTS	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES
S (TEMOIN)	0,73	A
SPN	0,73	A
SPG	0,69	A B
C (TEMOIN)	0,69	A B
CNG	0,66	A B
STSP	0,63	A B
CPG	0,58	A B
SNG	0,57	A B
CTSP	0,56	A B
CPN	0,52	B

les plus élevées sont observées chez la vesce.

X.3.2- Role de la nature du sol :

3.2.1- Orge :

a) Sol calcaire : Les teneurs en Ca sont faibles puisqu'elles n'excèdent pas les 0,85% de MS.

b) Sol non calcaire : Les teneurs en calcium atteignent 0,77% de MS pour les essais T et PN, pour les autres essais ils sont plus faibles.

c) Comparaison sol calcaire / sol non calcaire :

D'une manière générale, les teneurs en Ca pour l'orge sont plus élevées en sol non calcaire qu'en sol calcaire.

3.2.2 - Vesce :

a) Sol calcaire : Les teneurs en calcium de la vesce restent faibles, particulièrement pour le traitement PN.

b) Sol non calcaire : Pour les différents traitements les valeurs du calcium sont faibles.

c) Comparaison sol calcaire/sol non calcaire :

Pour les essais T, PN et TSP le sol non calcaire semble favoriser une meilleure assimilation du calcium. Au contraire, en sol calcaire ce sont les traitements PG et NG qui révèlent des teneurs moins faibles en calcium.

L'analyse de la variance (tabl.X.6) montre l'effet très hautement significatif du facteur sol ; les sols non calcaires non amendés et ceux fertilisés en PN donnent les meilleurs résultats. Cette constatation est probablement à lier à un blocage dû aux fortes concentrations du Ca dans les sols calcaires (DIEHL,1975). Il apparait aussi que la vesce prélève des teneurs en calcium plus importantes que l'orge (tabl.X.7).

Concernant l'interaction sol x végétal, elle est aussi T.H.S.(tabl.X.8): nous remarquons une nette dominance du sol calcaire fertilisé en NG pour la vesce, les résultats les moins bons sont obtenus par l'orge sur sol non calcaire amendé en NG.

A la lumière de ces résultats nous pouvons déduire que la quantité de calcium dans les tissus des végétaux est en étroite relation avec l'espèce végétale, la nature du sol et le type de fertilisants utilisés.

TABLEAU X .7 : TEST NEWMAN KEULS (seuil = 5%) : Facteur végétal.

VEGETAL	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES
VESCE	0,69	A
ORGE	0,58	B

TABLEAU X .8 : TEST NEWMAN KEULS (seuil = 5%): Interaction
sol x végétal.

TRAITEMENTS	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES
C [PN + PG] VESCE	0,8150	A
S [TEMOIN] ORGE	0,7750	A B
S [PN] ORGE	0,7700	A B
S [TSP] VESCE	0,7750	A B
C [PG] VESCE	0,7200	A B C
S [PN + PG] VESCE	0,7100	A B C
S [PG] VESCE	0,6950	A B C
S [PG] ORGE	0,6950	A B C
S [TEMOIN] VESCE	0,6900	A B C
C [TEMOIN] ORGE	0,6900	A B C
S [PN] VESCE	0,6850	A B C
C [TEMOIN] VESCE	0,6850	A B C
C [TSP] VESCE	0,6500	A B C
C [PN] ORGE	0,5250	A B C
C [PN] VESCE	0,5150	B C
C [PN + PG] ORGE	0,5050	B C
S [TSP] ORGE	0,5000	B C
C [TSP] ORGE	0,4750	B C
C [PG] ORGE	0,4400	C
S [PN + PG] ORGE	0,4350	C

X.4 : - LE MAGNESIUM :

X.4.1.ROLE DE LA NATURE DU VEGETAL :

4.1.1- Sol calcaire :

a) Orge : Les teneurs en Mg sont comprises entre 0,4 (PG) et 0,6% de MS (NG) (fig.10.7).

b) Vesce : Les valeurs en Mg varient entre 0,48 (T) et 0,55% de MS (TSP) (fig.10.8).

c) Comparaison orge/vesce : Les teneurs en Mg dans l'orge sont plus importantes pour les essais T, PN et NG; par contre pour les autres essais c'est la vesce qui est plus riche en Mg.

4.1.2- Sol non calcaire :

a) Orge : Les teneurs en Mg les plus élevées sont observées pour le traitement PN et les valeurs les plus basses pour l'essai témoin .

b) Vesce : Les teneurs en Mg sont pratiquement les mêmes pour tous les essais, avec une légère supériorité pour le substrat PG .

c) Comparaison orge/vesce : Les teneurs en Mg sont faibles dans les tissus tant de l'orge que de la vesce par rapport aux normes données par HELLER (1981).

L'analyse de la variance (tabl.X.9) montre un effet non significatif du facteur végétal.

X.4.2-ROLE DE LA NATURE DU SOL :

4.2.1- Orge :

a) Sol calcaire : Le traitement NG est le plus

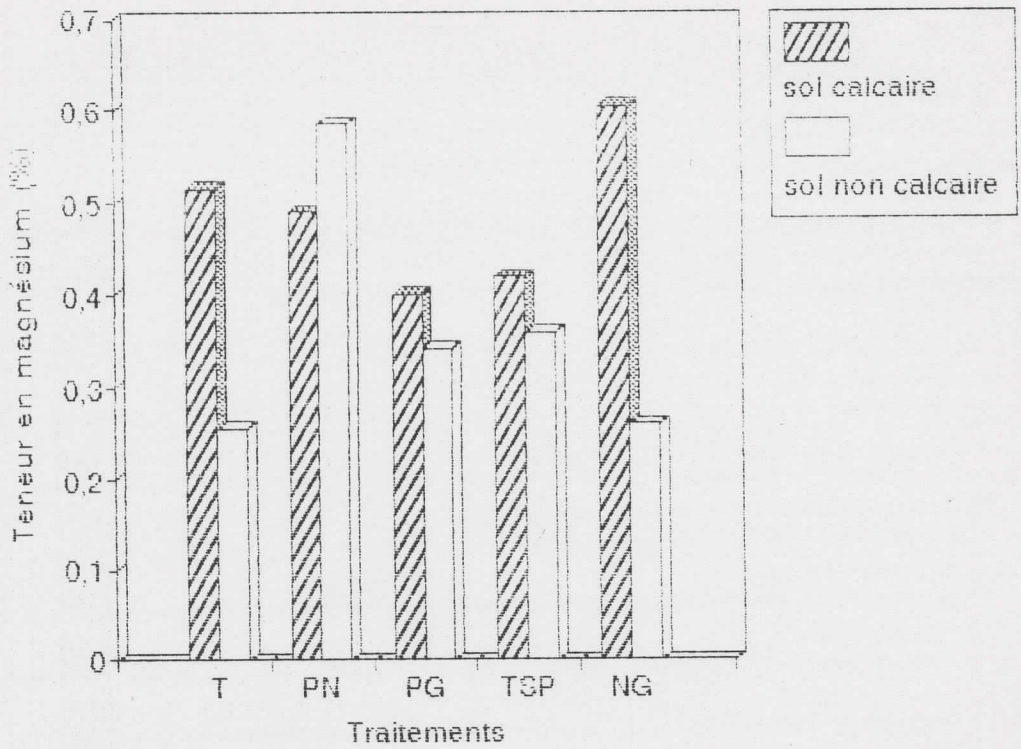


FIGURE 10.7 : INFLUENCE DES DIFFERENTS TRAITEMENTS SUR LA TENEUR EN MAGNESIUM CHEZ L'ORGE.

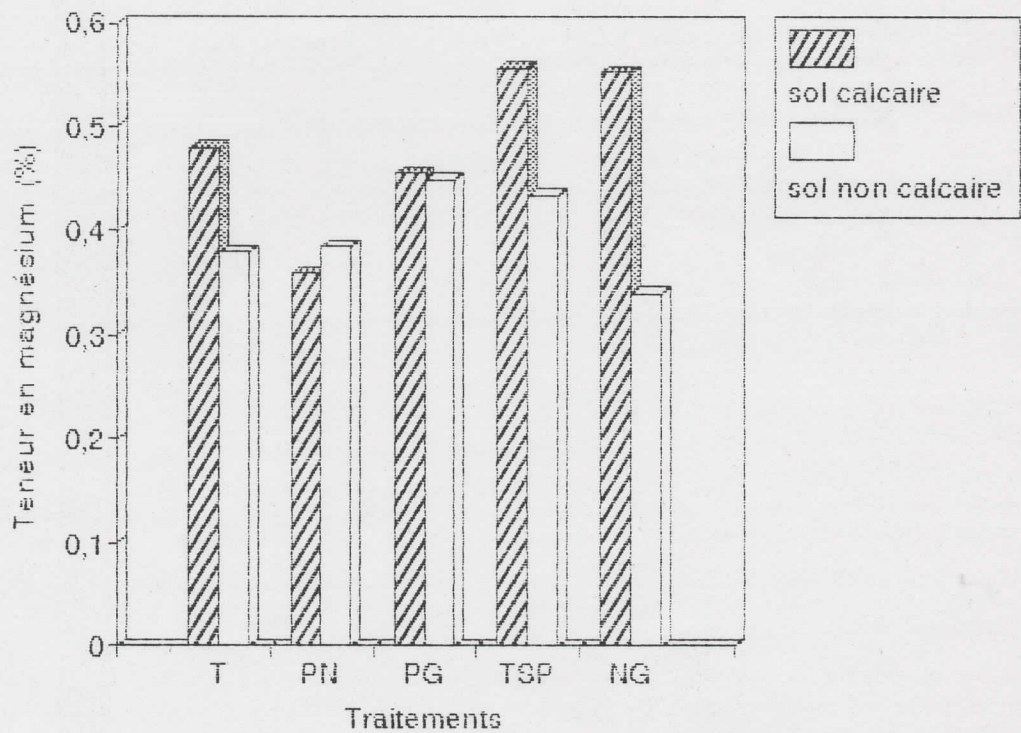


FIGURE 10.8 : INFLUENCE DES DIFFERENTS TRAITEMENTS SUR LA TENEUR EN MAGNESIUM CHEZ LA VESCE.

dominant, avec une teneur de l'ordre de 0,6% de MS ; le substrat PG est celui qui présente le plus faible résultat en Mg.

b) **Sol non calcaire** : Les teneurs les plus élevées sont observées pour le traitement PN (0,58% de MS) et les plus faibles sont enregistrées pour l'essai témoin (0,25% de MS).

c) **Comparaison sol calcaire/sol non calcaire** : Les teneurs en Mg les plus élevées sont enregistrées par le sol calcaire, notamment pour le traitement au NG.

4.2.2- Vesce :

a) **Sol calcaire** : Les teneurs en magnésium les plus fortes sont obtenues par le traitement TSP (0,55% de MS) et les plus faibles valeurs sont enregistrées pour le traitement au PN (0,36% de MS).

b) **Sol non calcaire** : Les teneurs en Mg sont proches pour les différents essais, elles sont de l'ordre de 0,45% de MS.

c) **Comparaison sol calcaire/sol non calcaire** : Les teneurs en Mg, en sol calcaire, sont plus élevées que celles en sol non calcaire, particulièrement pour l'essai NG.

L'analyse de la variance montre que le facteur sol est THS, avec une dominance du sol calcaire amendé en NG (tabl.X.10).

L'interaction sol x végétal est significative, les meilleurs résultats sont donnés par l'orge, ayant été fertilisé avec un mélange NG, sur sol calcaire. Vient ensuite le sol non calcaire avec PN, suivi par la vesce avec les essais TSP et NG, tous deux en sol calcaire (tabl.X.11)

TABLEAU X .11 : TEST NEWMAN KEULS (seuil = 5%): Interaction
sol x végétal.

TRAITEMENTS		MOYENNES	GROUPES HOMOGENES	
C NG	ORGE	0,605	A	
S PN	ORGE	0,585	A	
C TSP	VESCE	0,555	A	
C NG	VESCE	0,552	A	
C PN	ORGE	0,490	A	B
C (TEMOIN)	VESCE	0,480	A	B
C PG	VESCE	0,455	A	B
S PG	VESCE	0,450	A	B
S TSP	VESCE	0,435	A	B
C TSP	ORGE	0,420	A	B
C PG	ORGE	0,400	A	B
S PN	VESCE	0,385	A	B
S (TEMOIN)	VESCE	0,380	A	B
C (TEMOIN)	ORGE	0,380	A	B
C PN	VESCE	0,360	A	B
S TSP	ORGE	0,360	A	B
S NG	VESCE	0,340	A	B
S PG	ORGE	0,340	A	B
S NG	ORGE	0,260		B
S (TEMOIN)	ORGE	0,255		B

TABLEAU X .9 : ANALYSE DE LA VARIANCE : Effet sol et végétal sur la quantité de Magnésium prélevée par les cultures.

Source de Var.	S.C.E	DDL	C.M	TEST F	PROB.	SIGN.
Variation Totale	2270683,20	99	22936,20			
Variation Facteur Sol	599330,75	9	66592,31	3,96	0,0004	T. H. S
Variation Facteur Végétal	22052,75	1	22052,75	1,31	0,2543	N. S
Variation Inter FlxF2	304719,75	9	33857,75	2,01	0,0480	S
Variation Résiduelle	1344580,00	80	16807,25			

TABLEAU X .10 : TEST NEWMAN KEULS (seuil = 5%): Facteur sol.

TRAITEMENTS	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES
CNG	0,578	A
CTSP	0,487	A B
SPN	0,485	A B
C (TEMOIN)	0,430	A B C
CPG	0,427	A B C
CPN	0,425	A B C
STSP	0,397	B C
SPG	0,395	B C
S (TEMOIN)	0,317	B C
SNG	0,300	C

Ceci nous emmène à dire que les fertilisants NG sont stimulateurs de l'assimilation de Mg, surtout en sol calcaire et particulièrement chez l'orge. Cette interaction Mg, Ca et P est d'ailleurs signalée par HELLER (1981).

X.5 :- LE SODIUM :

X.5.1- ROLE DE LA NATURE DU VEGETAL :

5.1.1- Sol calcaire :

a) orge : Les teneurs en Na de l'orge sont relativement élevées puisqu'elles sont supérieures à 0,4% de MS ; ceci est dû indéniablement à la tolérance de l'orge vis à vis de l'élément Na, comme le signale PETERS (1983).

D'autre part, DAJOZ (1982) rapporte que l'orge est un glycohalophyte (espèce résistant à des concentrations de Na dépassant les 10g/l).

Les teneurs les plus importantes sont obtenues pour le témoin (fig.10.9).

b) Vesce : Les teneurs en Na sont faibles pour les différents essais, notamment pour le PN (fig.10.10).

c) Comparaison orge/vesce : Les teneurs en sodium sont variables, cependant l'orge présente les concentrations en Na les plus élevées et ce pour n'importe quel essai.

5.1.2- Sol non calcaire :

a) orge : Les teneurs en Na oscillent entre 0,96 et 1,71% de MS. La concentration la plus élevée est observée chez le traitement au PN.

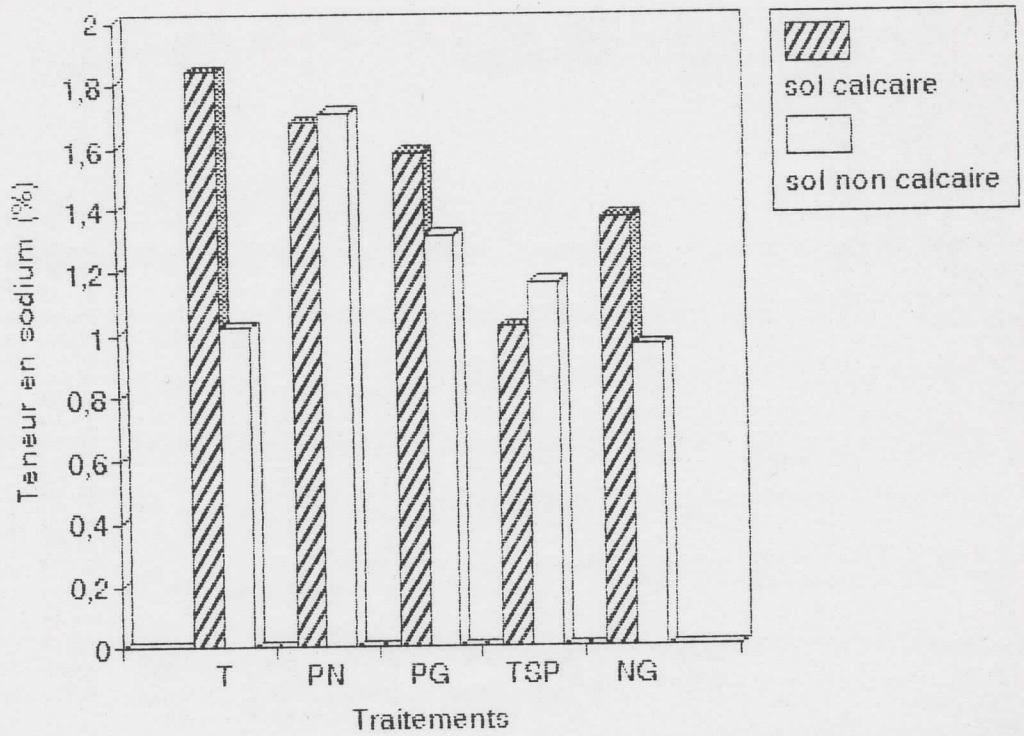


FIGURE 10.9 : INFLUENCE DES DIFFERENTS TRAITEMENTS SUR LA TENEUR EN SODIUM CHEZ L'ORGE.

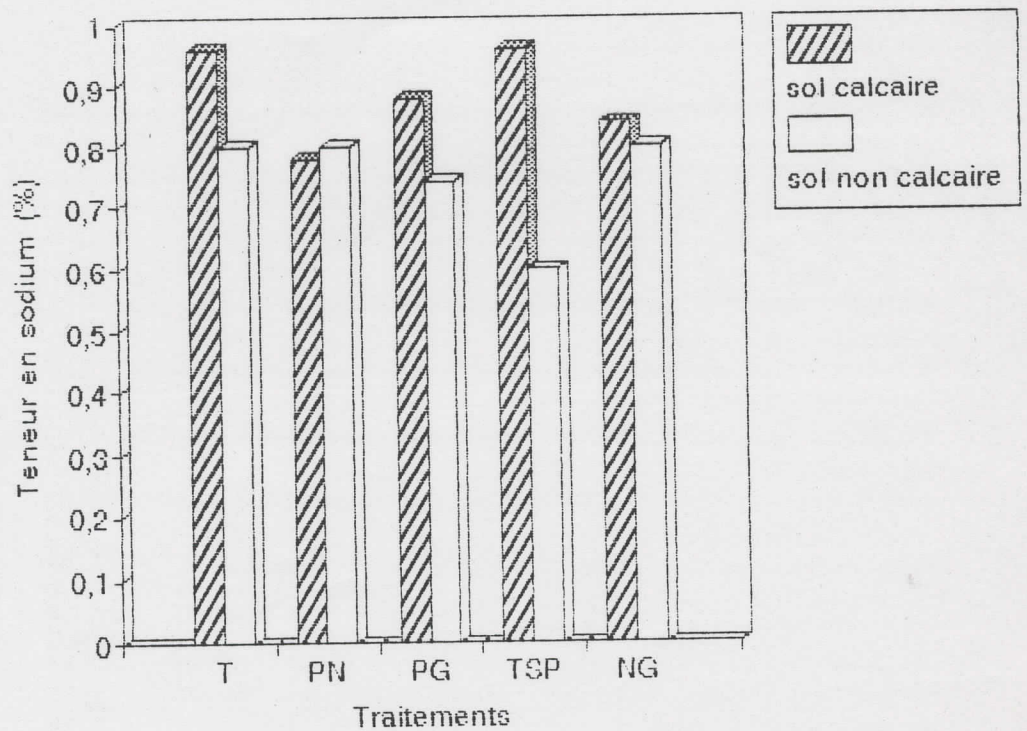


FIGURE 10.10 : INFLUENCE DES DIFFERENTS TRAITEMENTS SUR LA TENEUR EN SODIUM CHEZ LA VESCE.

b) Vesce : Les teneurs en Na varient entre 0,6% de MS (TSP) et 0,8% de MS (NG, PN et T).

c) Comparaison orge/vesce : Les teneurs en Na dans l'orge sont plus importantes que dans la vesce.

Le tableau de l'analyse de la variance montre l'effet THS du facteur végétal avec une nette dominance de l'orge par rapport à la vesce (tabl.X.12).

X.5.2- ROLE DE LA NATURE DU SOL :

5.2.1- Orge :

a) Sol calcaire : Les teneurs les plus faibles sont obtenues pour le TSP et les plus fortes pour l'essai témoin.

b) Sol non calcaire : Les teneurs en Na oscillent entre 0,96 (NG) et 1,71% de MS (PN).

c) Comparaison sol calcaire/sol non calcaire :

On remarque que les valeurs de Na sont plus élevées en sols calcaires pour les essais T, PG et NG. Par contre, pour les essais PN et TSP les teneurs en Na dominantes sont sur sol non calcaire.

D'autre part, on constate que la différence entre les valeurs en Na est plus nette pour les traitements T, PG et NG que pour les essais restants (fig.10.9).

5.2.2- Vesce :

a) Sol calcaire : Les teneurs les plus élevées se retrouvent dans les essais TSP et T, et les plus faibles concentrations en Na sont données par l'essai PN.

TABEAU X .12 : ANALYSE DE LA VARIANCE : Effet sol et végétal sur la quantité de sodium prélevé par les cultures.

Source de Variation	S.C.E	DDL	C.M	TESTF	PROB.	SIGNIF.
Variation Totale	15644276	99	158022,98			
Variation Facteur Sol	2190526	9	243391,78	3,49	0,0011	H. S
Variation F.Végétal	4950627	1	4950627	71,01	0,0000	T. H. S
Variation Interaction F1xF2	2926123	9	325124,78	4,66	0,0001	T. H. S
Variation Résiduelle	1344580	80	16807,25			

b) sol non calcaire : les teneurs en Na oscillent entre 0,6 (TSP) et 0,8% de MS (T, PN et NG).

c) Comparaison sol calcaire/sol non calcaire :

En sol calcaire les valeurs de Na semblent plus fortes, particulièrement pour le traitement TSP.

L'analyse de la variance (tabl.X.13 et 14) montre un effet HS pour le facteur sol ; les meilleurs résultats pour le sol non calcaire fertilisé en PN , sur sol calcaire amendé en PN et en PG.

Quant au facteur interaction sol x végétal, il est THS : les meilleurs résultats sont donnés par l'orge sur sol non calcaire amendé en PN , puis sur sol calcaire fertilisé avec du PN, puis sur sol calcaire avec PG (tabl.X.15).

b) sol non calcaire : les teneurs en Na oscillent entre 0,6 (TSP) et 0,8% de MS (T, PN et NG).

c) Comparaison sol calcaire/sol non calcaire :

En sol calcaire les valeurs de Na semblent plus fortes, particulièrement pour le traitement TSP.

L'analyse de la variance (tabl.X.13 et 14) montre un effet HS pour le facteur sol ; les meilleurs résultats pour le sol non calcaire fertilisé en PN , sur sol calcaire amendé en PN et en PG.

Quant au facteur interaction sol x végétal, il est THS : les meilleurs résultats sont donnés par l'orge sur sol non calcaire amendé en PN , puis sur sol calcaire fertilisé avec du PN, puis sur sol calcaire avec PG (tabl.X.15).

TABLEAU X .13 : Test NEWMAN KEULS (seuil = 5%)
Facteur Sol

Traitements	Moyennes (10^{-3})	Groupes Homogènes
S PN	1255,00	A
C PN	1230,00	A
C PG	1230,00	A
C NG	1105,00	A
S PG	1025,00	A
C TSP	990,00	A
S (TEMOIN)	910,00	A
S NG	880,00	A
S TSP	880,00	A
C (TEMOIN)	880,00	A

TABLEAU X .14 : Test NEWMAN KEULS (seuil = 5%)
Facteur Végétal

Végétal	Moyennes	Groupes Homogènes
Orge	1,261	A
Vesce	0,816	B

TABLEAU X .15 : Test NEWMAN KEULS (seuil = 5%)
 interaction sol x végétal

Traitements	Moyennes (10^{-3})	Groupes Homogènes
S PN ORGE	1710,00	A
C PN ORGE	1680,00	A
C PG ORGE	1580,00	A B
C NG ORGE	1370,00	A B C
S PG ORGE	1310,00	A B C D
S TSP ORGE	1160,00	B C D E
S (TEMOIN) ORGE	1020,00	C D E
C TSP ORGE	1020,00	C D E
S NG ORGE	960,00	C D E
C TSP VESCE	960,00	C D E
C (TEMOIN) VESCE	960,00	C D E
C PG VESCE	880,00	C D E
C NG VESCE	840,00	C D E
S PN VESCE	800,00	C D E
S NG VESCE	800,00	C D E
S (TEMOIN) VESCE	800,00	C D E
C (TEMOIN) ORGE	800,00	C D E
C PN VESCE	780,00	D E
S PG VESCE	740,00	D E
S TSP VESCE	600,00	E

X.6.LE CUIVRE :

X.6.1.ROLE DE LA NATURE DU VEGETAL:

6.1.1.Sol calcaire :

a) Orge : Les teneurs en cuivre sont assez élevées puisqu'elles excèdent les valeurs données par HELLER (1981) qui sont de l'ordre de 0,001% de MS, comme le montre la figure (10.11).

b) Vesce : Les teneurs en Cu sont de l'ordre de 0,001 à 0,003% de MS pour respectivement les traitements PN et PG (fig.10.12).

c) Comparaison orge/vesce : La vesce renferme plus de cuivre que l'orge. l'essai PG le montre bien .

6.1.2.Sol non calcaire :

a)Orge : Les valeurs en cuivre dans l'orge sont au delà des normes de la bibliographie sauf pour le traitement au PN comme nous l'observons sur la figure (10.11).

b) Vesce : Les teneurs en Cu sont de l'ordre de 0,0006% (TSP) à 0,0017% de MS (PN).

c) Comparaison orge/vesce : La vesce renferme plus de cuivre dans ses tissus que l'orge.

L'analyse de la variance (tabl.X.16) montre que le facteur végétal est non significatif.

X.6.2.ROLE DE LA NATURE DU SOL :

6.2.1.Orge :

a) Sol calcaire : Les teneurs les plus élevées sont observées pour les essais TSP et NG.

b) sol non calcaire : Les valeurs en Cu sont faibles dans l'orge pour le PN mais pour les autres essais les valeurs en cuivre sont élevées.

c) Comparaison sol calcaire/sol non calcaire : Les essais PN, TSP et NG montrent une plus forte teneur en cuivre sur sol calcaire, par contre pour les autres essais c'est le sol non calcaire qui présente une teneur plus élevée en cuivre.

6.2.2.Vesce :

a) Sol calcaire : Les teneurs en cuivre oscillent entre 0,001 et 0,003% de MS pour respectivement les traitements PN et PG.

b) Sol non calcaire : Les teneurs en cuivre varient entre 0,0006 (TSP) et 0,0017% de MS (PN).

c) Comparaison sol calcaire/sol non calcaire : Les valeurs en cuivre sont plus importantes en sol calcaire qu'en sol non calcaire, sauf pour le PN où l'inverse est observé.

L'analyse de la variance (tabl.X.17) un effet THS pour le facteur sol, particulièrement pour le sol calcaire fertilisé en NG ou en TSP. Ceci contredit BENABDELHAKEM, (1978)cité par ALI HAIMOUD (1983) qui rapporte que le calcaire diminue la solubilité des oligo éléments et par conséquent leur absorption par la plante. Par ailleurs des interactions entre le cuivre et le calcium sont signalées.

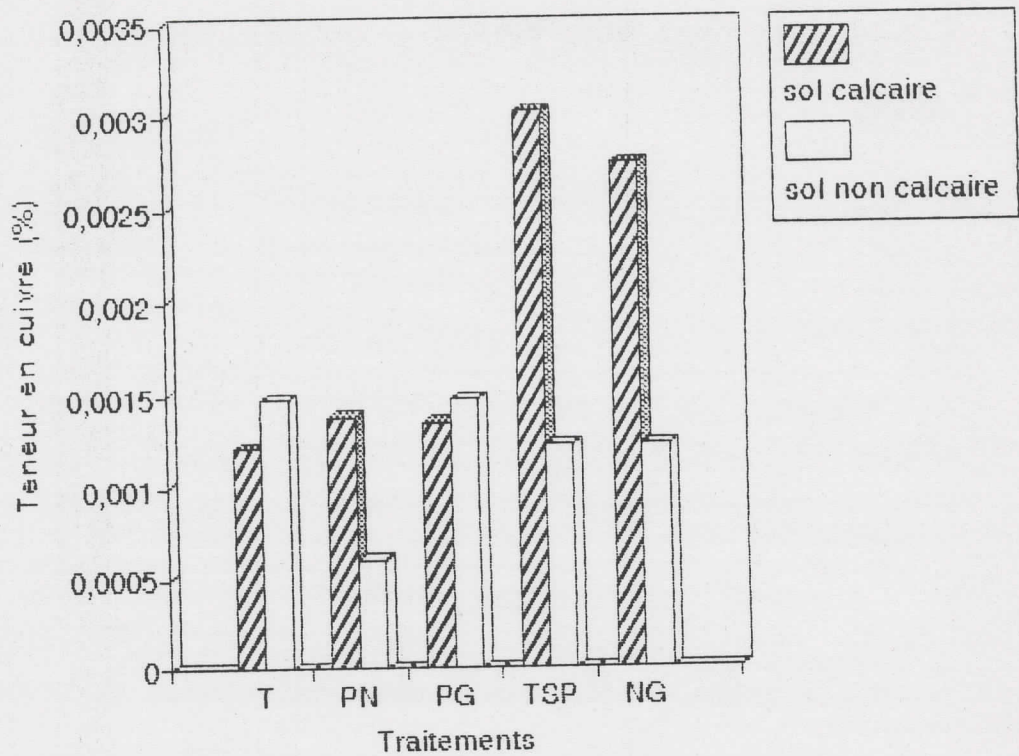


FIGURE 10.11 : INFLUENCE DES DIFFERENTS TRAITEMENTS SUR LA TENEUR EN CUIVRE CHEZ L'ORGE.

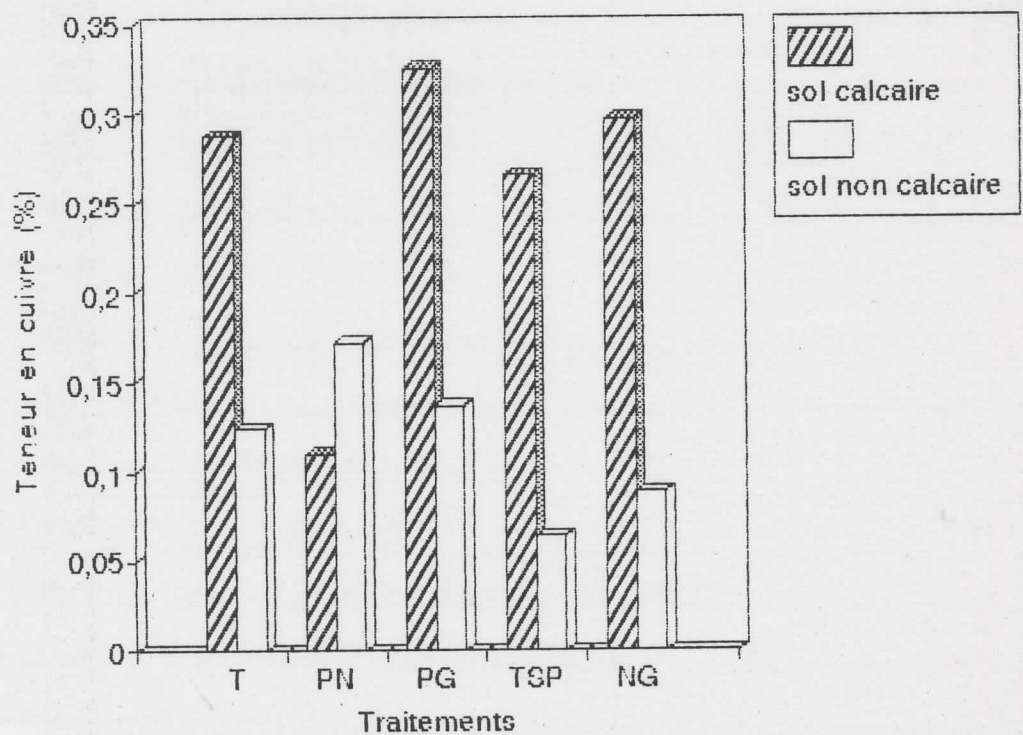


FIGURE 10.12 : INFLUENCE DES DIFFERENTS TRAITEMENTS SUR LA TENEUR EN CUIVRE CHEZ LA VESCE.

TABLEAU X .16 : ANALYSE DE LA VARIANCE : Effet sol et végétal sur la quantité de cuivre prélevée par les cultures.

Source de Variation	S.C.E	DDL	C.M	TESTF	PROB.	SIGNIF.
Variation Totale	170732352	99	1724569,25			
Variation Facteur Sol	48632360	9	5403595,50	4,58	0,0002	T. H. S
Variation F.Végétal	190368,00	1	2190368,0	1,73	0,1884	N. S
Variation Interaction F1xF2	18885624	9	2098402,80	1,66	0,1117	N. S
Variation Résiduelle	101024000	80	1267800,00			

TABLEAU X .17 : Test NEWMAN KEULS (seuil = 5%) : Facteur sol.

Traitements	Moyennes (10^{-6})	Groupes Homogènes
C NG	2865,00	A
C TSP	2845,00	A
C PG	2305,00	A B
C (TEMOIN)	2060,00	A B
S PG	1420,00	B
S (TEMOIN)	1360,00	B
C PN	1240,00	B
S PN	1155,00	B
S NG	1060,00	B
S TSP	930,00	B

Quant au facteur interaction sol x végétal, l'analyse de la variance ne montre aucun effet significatif.

X.7.LE ZINC :

X.7.1.ROLE DE LA NATURE DU VEGETAL :

7.1.1.Sol calcaire :

a) Orge : Les teneurs en zinc sont élevées , puisqu'elles sont supérieures à $10^{-3}\%$ de MS (HELLER, 1981), particulièrement pour le TSP.

b) Vesce : Les teneurs en Zn de la vesce sont supérieures à $10^{-3}\%$ de MS, notamment pour le PG.

c) Comparaison orge/vesce : Les teneurs en Zn pour la vesce sont nettement supérieures à celles de l'orge, notamment pour le traitement au PG.

7.1.2.Sol non calcaire :

a) Orge : La plus haute valeur en Zn est observée pour l'essai NG et la plus faible pour le PN (fig.10.13).

b) Vesce : Les plus fortes valeurs sont données par NG et les plus faibles teneurs sont observées pour le traitement TSP (fig.10.14).

c) Comparaison orge/vesce : En sol calcaire les teneurs en zinc sont plus élevées chez la vesce pour les essais T, PN et PG. Pour les autres essais, au contraire, c'est l'orge qui renferme plus de zinc dans ses tissus.

L'analyse de la variance (tabl.X.18) fait apparaitre, cependant, que le facteur végétal n'a aucun effet significatif.

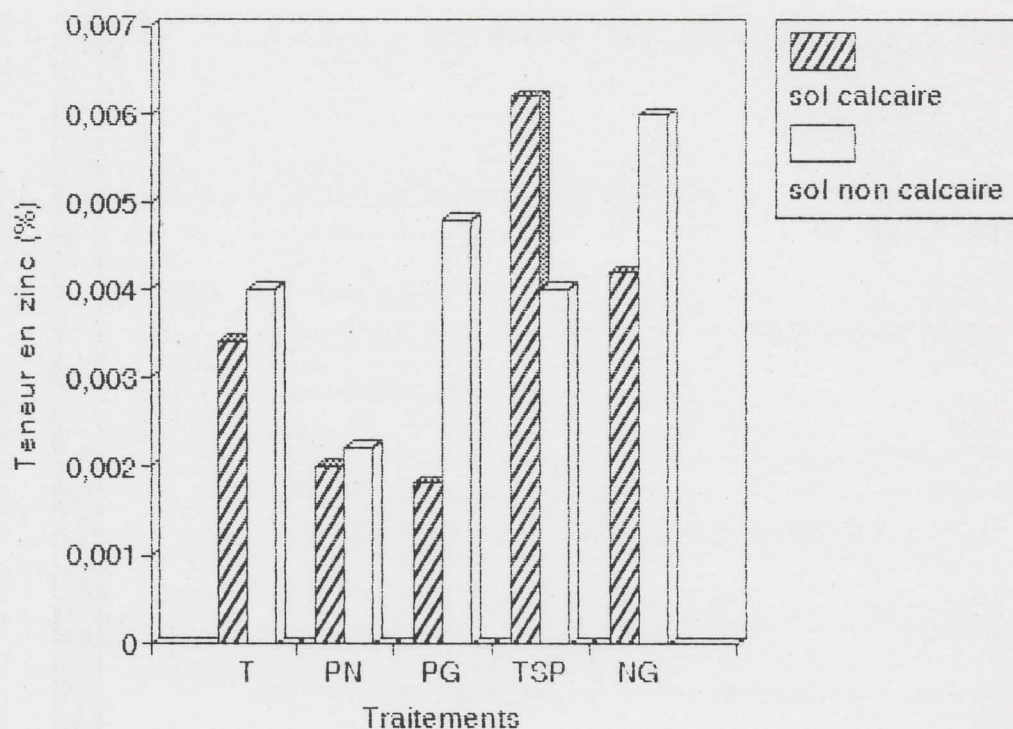


FIGURE 10.13 : INFLUENCE DES DIFFERENTS TRAITEMENTS SUR LA TENEUR EN ZINC CHEZ L'ORGE.

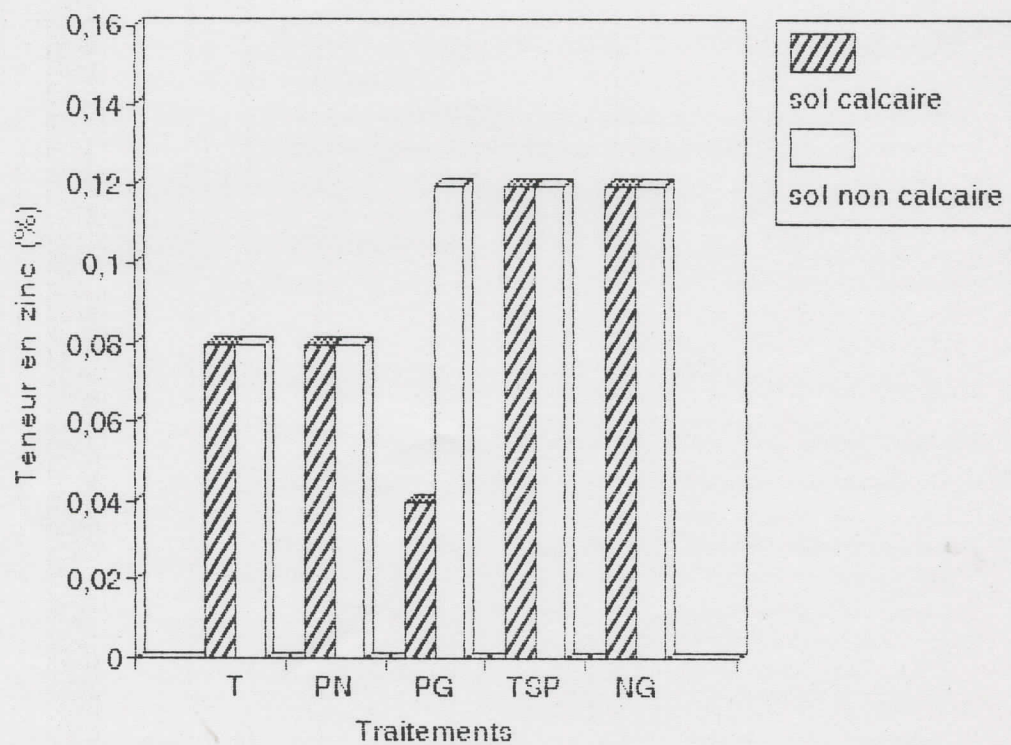


FIGURE 10.14 : INFLUENCE DES DIFFERENTS TRAITEMENTS SUR LA TENEUR EN ZINC CHEZ LA VESCE.

X.7.2.ROLE DE LA NATURE DU SOL :

7.2.1.Orge :

a) Sol calcaire : Les essais PG et PN sont ceux dont les résultats en Zn sont les moins élevés, alors que le traitement TSP est celui pour lequel nous obtenons la teneur en zinc la plus importante.

b) Sol non calcaire : Les teneurs les plus performantes sont obtenues pour l'essai NG, les valeurs les plus basses sont données par le substrat PN.

c) Comparaison sol calcaire/sol non calcaire :

Pour l'orge, le sol non calcaire est celui qui présente les quantités en zinc les plus élevées, sauf en ce qui concerne l'essai au TSP où, au contraire, les teneurs en Zn les plus importantes sont observées sur sol calcaire.

7.2.2.Vesce :

a) Sol calcaire : Les teneurs en Zn sont assez élevées, particulièrement pour le PG.

b) Sol non calcaire : Les teneurs les plus élevées sont données par le NG et les plus basses par le TSP.

c) Comparaison sol calcaire/ sol non calcaire :

Le sol calcaire présente les valeurs en Zn les plus importantes pour les essais T, PG et TSP, alors que le sol non calcaire obtient des résultats performants pour les traitements PN et NG.

L'analyse de la variance montre que le facteur sol a un effet significatif sur les quantités de zinc des tissus végétaux. L'essai le plus performant est donné par le substrat TSP sur sol calcaire (tabl.X.19).

TABLEAU X .18 : ANALYSE DE LA VARIANCE : Effet sol et végétal sur la quantité de zinc prélevée par les cultures.

Source de Variation	S.C.E	DDL	C.M	TESTF	PROB.	SIGNIF.
Variation Totale	6446400,50	99	65115,16			
Variation Facteur Sol	1118400,50	9	124266,72	2,26	0,0259	S
Variation F.Végétal	176400,50	1	176400,50	3,21	0,0732	N.S
Variation Interaction F1xF2	759599,50	9	84399,95	1,54	0,1486	N.S
Variation Résiduelle	4392000,00	80	54900,00			

TABLEAU X .19 : Test NEWMAN KEULS (seuil = 5%) : Facteur Sol.

Traitements	Moyennes (10^{-5})	Groupes Homogènes
C TSP	610,00	A
S NG	570,00	A
C (TEMOIN)	550,00	A
S PG	500,00	A
S (TEMOIN)	450,00	A
C NG	410,00	A
C PG	410,00	A
S PN	330,00	A
C PN	310,00	A
S TSP	300,00	A

Il est d'ailleurs conseillé d'utiliser les superphosphates en sols calcaires (DIEHL, 1975), bien que le calcaire pose des problèmes de relations de blocage avec le zinc (GAUCHER, 1968).

L'interaction sol x végétal ne présente pas d'effet significatif.

X.8 - LE MANGANESE :

X.8.1. RÔLE DE LA NATURE DU VÉGÉTAL :

8.1.1. Sol calcaire :

a) Orge : Les teneurs en Mn sont moyennes et correspondent à celles trouvées dans la bibliographie.

Le traitement PG est celui qui présente les plus faibles teneurs et les essais TSP et NG sont ceux qui donnent les valeurs en Mn supérieures à celles données par HELLER (1981).

b) Vesce : Dans l'essai TSP, la vesce renferme du Mn à l'état de trace, alors que pour les autres traitements les teneurs en manganèse sont moyennes, pour le PN les valeurs sont supérieures à 0,1% de MS.

c) Comparaison orge/vesce : Les teneurs en Mn sont équivalentes chez les deux espèces végétales pour les essais T et PG, la vesce est plus riche en Mn pour le traitement PN et pour les autres traitements c'est l'orge qui renferme plus de manganèse dans ses tissus.

8.1.2. Sol non calcaire :

a) Orge : Les teneurs en Mn sont plus élevées pour les essais PG, TSP et NG, les autres valeurs sont un peu plus faibles (fig.10.15).

b) Vesce : Les teneurs en Mn les plus importantes sont obtenues pour l'essai NG, viennent en seconde position les traitements PN, PG et TSP dont les teneurs sont toutefois identiques et enfin l'essai témoin, pour qui le manganèse est à l'état de trace (fig.10.16).

c) Comparaison orge/vesce : Les teneurs en Mn sont plus faibles dans la vesce, particulièrement pour l'essai témoin.

L'analyse de la variance (tabl.X.20) montre un effet significatif du facteur végétal, les meilleurs résultats sont obtenus chez l'orge.

X.8.2. ROLE DE LA NATURE DU SOL :

8.2.1. Orge :

a) Sol calcaire : Les teneurs en Mn oscillent entre 0,004 et 0,012% de MS respectivement pour PG et TSP, d'une part, et NG d'autre part.

b) Sol non calcaire : Les teneurs oscillent entre 0,008 (T et PN) et 0,012% de MS pour les autres essais.

c) Comparaison sol calcaire/sol non calcaire : Les teneurs, en Mn, pour l'orge, sont identiques sur les deux types de sols sauf pour le traitement PG où les teneurs en Mn sur sol calcaire représentent environ le tiers de celles obtenues en sol non calcaire.

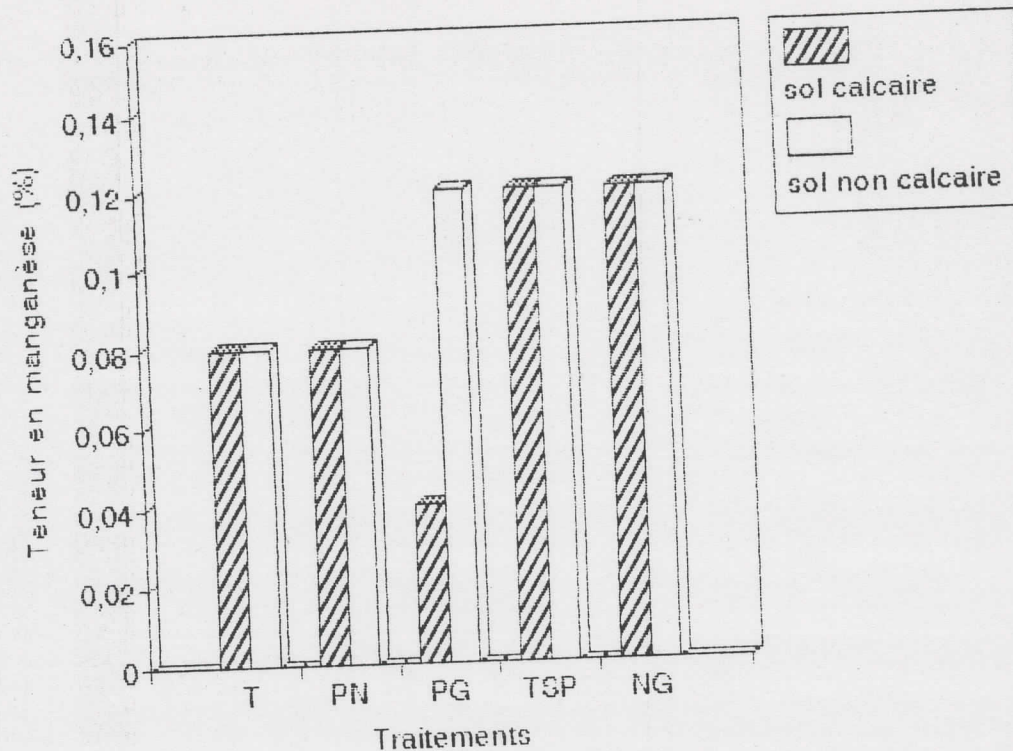


FIGURE 10.15 : INFLUENCE DES DIFFERENTS TRAITEMENTS SUR LA TENEUR EN MANGANESE CHEZ L'ORGE.

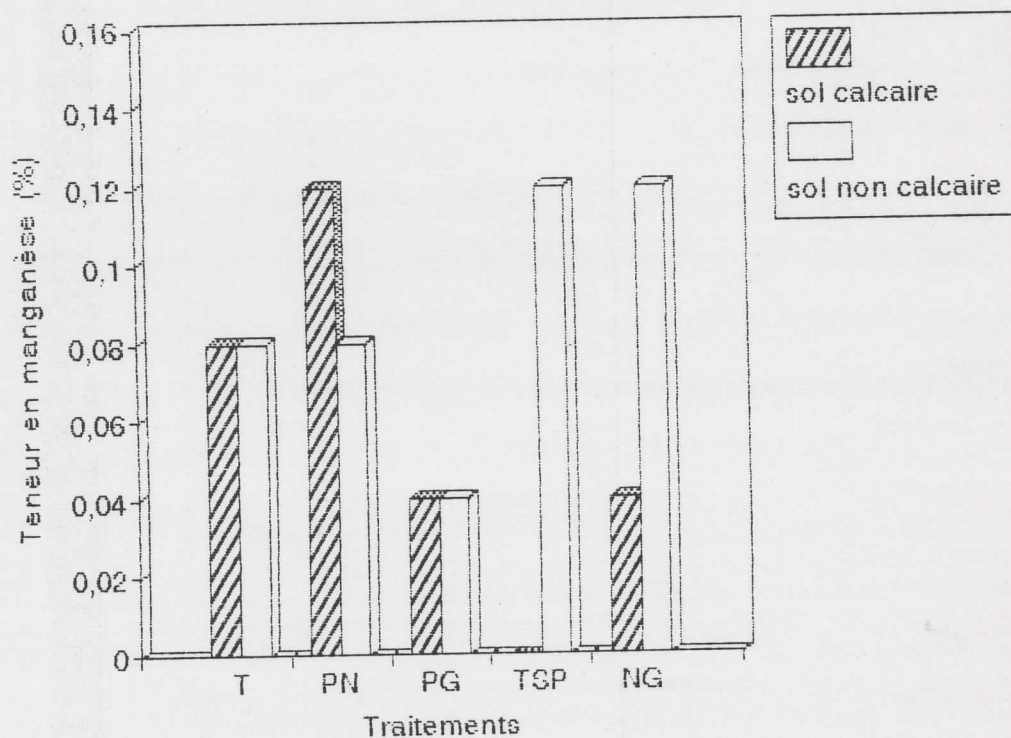


FIGURE 10.16 : INFLUENCE DES DIFFERENTS TRAITEMENTS SUR LA TENEUR EN MANGANESE CHEZ LA VESCE.

8.2.2.Vesce :

a) Sol calcaire : Les teneurs oscillent entre 0,004 (PG et NG) et 0,012% de MS (PN). L'essai TSP, quant à lui, renferme du Mn à l'état de trace.

b) Sol non calcaire : Les valeurs les plus élevées sont données par l'essai NG, le traitement sans fertilisant (T) renferme du Mn à l'état de trace et les autres essais ont des valeurs équivalentes en Mn.

c) Comparaison sol calcaire/sol non calcaire : Pour les essais T et PN , c'est en sol calcaire que nous rencontrons de fortes teneurs en Mn, alors que pour l'essai PG les valeurs en Mn sont identiques pour les deux types de sols. Par contre, pour les essais TSP et NG, c'est dans le sol non calcaire que les teneurs en Mn sont les plus fortes.

L'analyse de la variance montre que le facteur sol est non significatif, il en est de même pour le facteur interaction sol x végétal (tableau X.20). ~~Par elle indique une différence significative entre les espèces végétales (tab.X.21)~~

TABLEAU X .20 : ANALYSE DE LA VARIANCE : Effet sol et végétal sur la quantité de manganèse prélevée par les cultures.

Source de Variation	S.C.E	DDL	C.M	TESTF	PROB.	SIGNIF.
Variation Totale	977600,06	99	9874,75			
Variation Facteur Sol	49600,06	9	5511,12	0,55	0,8334	N.S
Variation F.Végétal	4000,06	1	4000,06	4,00	0,0463	S
Variation Interaction F1xF2	87999,94	9	9777,77	0,98	0,4652	N.S
Variation Résiduelle	800000,00	80	10000,00			

TABLEAU X .21 : Test NEWMAN KEULS (seuil = 5%) : Facteur Végétal.

Végétal	Moyennes (10^{-4})	Groupes Homogènes
Orge	96,00	A
Vesce	48,00	B

X.9 : - SYNTHÈSE ET DISCUSSION DES RESULTATS.

Dans nos essais nous avons obtenu de faibles teneurs en azote et en potassium quelque soit le végétal utilisé. le facteur interaction sol x végétal n'est pas significatif pour ces deux éléments, par contre le facteur végétal est tantôt significatif pour la vesce (vis à vis du potassium) et tantôt non significatif (vis à vis de l'azote). Quant au facteur sol, il n'a aucun impact sur la quantité d'azote dans les tissus végétaux ; pour le potassium l'effet sol est significatif : le meilleur résultat est donné par le sol calcaire amendé en phosphogypse, la plus faible teneur en potassium est relevée sur sol non calcaire fertilisé en TSP.

Pour les éléments calcium et magnésium, les valeurs restent en dessous de celles rapportées par la bibliographie (HELLER, 1981), par contre pour l'orge les teneurs en sodium sont élevées. Le facteur interaction sol x végétal est très hautement significatif vis à vis du Ca et Na à significatif pour le Mg. Le facteur végétal est très hautement significatif pour les éléments Ca et Na, respectivement vis à vis de la vesce et de l'orge ; il est non significatif pour le Mg.

Quant au facteur sol, il est hautement significatif pour le calcium et le sodium à très hautement significatif pour le magnésium. Pour les oligo-éléments (Cu, Zn et Mn), les valeurs trouvées sont plutôt élevées.

Le facteur interaction sol x végétal est non significatif pour ces trois éléments.

Le facteur végétal est significatif vis à vis de l'orge seulement pour le manganèse, les autres éléments ne montrent aucune signification pour ce facteur.

Le facteur sol, lui, est très hautement significatif, significatif et non significatif respectivement pour le cuivre, le zinc et le manganèse.

Un tableau récapitulatif (tabl. X.22) résume les traitements ayant donné les teneurs les plus élevées et les plus basses pour les deux espèces végétales utilisées.

Remarque : Le fluor, dosé pour les différents essais effectués, est à l'état de traces dans les tissus végétaux.

D'autre part une fréquence moyenne des différents traitements utilisés fait ressortir que le PN est celui qui favorise la meilleure assimilation des éléments nutritifs, vient en seconde position le traitement NG puis celui du PG.

TABLEAU X.22 : récapitulatif des différents résultats obtenus.

E l é m e n t	Interaction sol x traitement x végétal			
	Combinaison la plus élevée		Combinaison la plus faible	
	Sol C	Sol S	Sol C	Sol S
N	PN Vesce	TSP Orge	PG Orge	PG Orge
K	PN Orge	PG Orge	PG Vesce	TSP Vesce
Ca	NG Vesce	T Orge	TSP Orge	TSP Orge
Mg	NG Orge	PN Orge	PN Vesce	T Orge
Na	PN Orge	PN Orge	PN Vesce	TSP Vesce
Cu	PG Vesce	PN Vesce	PN Vesce	PN Orge
Zn	PG Vesce	NG Orge	PG Orge	TSP Vesce
Mn	TSP Orge	PG Orge	T Orge	T Vesce
	NG Orge	TSP Orge		
	PN Vesce	NG Orge		

En complément des analyses de la variance des résultats obtenus, nous avons élaboré différentes matrices de corrélations pour tenter de mettre en évidence les effets des divers facteurs étudiés sur les relations probables entre les divers éléments minéraux.

L'analyse de la matrice réalisée avec toutes les observations pour les trois facteurs confondus (sol, traitements et végétal) n'indique aucune corrélation entre les différents éléments étudiés (annexe 9). Par contre, la prise en considération de chacun de ces facteurs, fait apparaître diverses corrélations tantôt positives tantôt négatives. Certains de ces résultats confirment l'existence des mécanismes de synergisme et d'antagonisme rapportés par HELLER (1968, 1981). Ainsi, on note des corrélations hautement significatives entre le phosphore et

certaines éléments tels que le zinc, le calcium et potassium. Cependant, dans ce cas précis, les traitements PN et TSP, pour l'orge seulement indiquent un blocage de l'élément phosphore par le potassium. En outre, le sodium semble antagoniste au phosphore, quelque soit la nature du sol, pour l'orge traité au TSP.

Par ailleurs, sur sol calcaire fertilisé en NG pour la vesce, on note un coefficient de corrélation de l'ordre de 0,968 (annexe 9). Par contre, dans la plupart des cas, une action antagoniste du calcium vis à vis des oligo-éléments est signalée.

Enfin, il apparaît que les traitements et le végétal interviennent dans la nature des éléments en corrélation et dans le type même de la corrélation (positive ou négative); ainsi que le montrent les résultats obtenus (annexe 9).

CONCLUSION GENERALE :

L'étude expérimentale menée sur l'action des phosphates naturels dans l'alimentation des végétaux a permis de mettre en relief divers aspects qui seraient intéressant à exploiter en vue d'une utilisation efficace et rationnelle des produits locaux d'une part et en vue d'une augmentation des rendements par l'amélioration de l'alimentation phosphatée des plantes, d'autre part.

En effet, l'utilisation de mélanges phosphates naturels/phosphogypse à quantité égale permet entre autre l'obtention d'un fertilisant à pH proche de la neutralité.

De même, l'évaluation des solubilités mesurées met en évidence l'eau comme étant le meilleur solvant pour le phosphate naturel ou le phosphogypse seul.

Par contre dans l'acide citrique c'est le phosphogypse qui présente la plus forte solubilité sur les mélanges PN/PG aux doses 20/20 et 12/28 ; l'apport croissant de phosphate naturel semble faire diminuer la solubilité du phosphore. Dans le citrate d'ammonium, la solubilité semble suivre les mêmes variations que celle dans l'acide citrique, bien que l'apport de phosphate naturel montre une légère variation du phosphore soluble.

Quant aux solubilités relatives, elles varient fortement avec la dose de mélange et le réactif utilisé, l'acide citrique restant le meilleur solvant pour la solubilisation du phosphore et l'eau le moins agressif.

L'utilisation des mélanges refus dépoussiérés/phosphogypse montre que la dose 12/28 permet d'obtenir un pH favorable à l'assimilation du phosphore par les végétaux.

Le calcul des solubilités mesurées et relatives pour les mélanges refus dépoussiérés/phosphogypse fait apparaître une forte variation des différentes solubilités, particulièrement en ce concerne la solubilité citrique. Pour ces mélanges l'acide citrique se révèle être le meilleur solubilisateur de phosphore. Pour les autres solvants, il semble que la quantité de phosphogypse intervient sur la quantité de phosphore soluble.

Afin de permettre aux utilisateurs de choisir la mélange le plus intéressant, une comparaison entre les deux types de mélanges testés a été effectuée.

Ainsi, pour des doses croissantes en phosphogypse la variation du pH est plus importante pour les mélanges refus dépoussiérés/phosphogypse que pour ceux des phosphates naturels/phosphogypse. Par contre, pour des doses supérieures à 16/24 c'est l'inverse qui se produit, c.a.d que la variation du pH est plus importante pour les mélanges phosphates naturels/phosphogypse, mais de façon moins accentuée.

A quantités égales ou presque (16/24, 20/20 et 24/16) la variation du pH est très faible tant pour les mélanges phosphates naturels/phosphogypse que pour ceux des refus dépoussiérés/phosphogypse.

D'autre part, si le citrate d'ammonium et l'eau représentent les meilleurs solvants vis à vis du phosphate naturel, c'est au contraire l'acide citrique qui est plus intéressant pour les refus dépoussiérés. Donc, la nature du solvant et la dose de mélange la plus adéquate est mise en relief pour le choix d'un fertilisant phosphaté.

Concernant la quantité de phosphore assimilable, les résultats dans l'ensemble montrent un double effet du phosphogypse ; tantôt stimulateur en présence de phosphates naturels, tantôt inhibiteur en mélange avec les refus dépoussiérés.

La dernière étape de notre expérimentation relative à la nutrition des plantes, fait ressortir les points suivants :

Un effet positif du calcaire sur la quantité de phosphore assimilé notamment pour la vesce.

L'efficacité agronomique relative semble être moyenne à basse pour l'ensemble des essais effectués, on note cependant une variation selon le traitement utilisé : le mélange (phosphates naturels/phosphogypse) s'avère plus efficace que le phosphate naturel et le phosphogypse.

Par ailleurs, l'étude des fertilisants phosphatés sur la nutrition en éléments autres que le phosphore montre tout d'abord de faibles teneurs pour la majorité des éléments dosés.

En ce qui concerne les facteurs sol, végétal et traitements et leurs inter-relations, leur impact est très différent selon l'élément étudié.

Alors que la matrice de corrélation avec les observations sur sols, végétaux et traitements confondus ne montre aucune corrélation entre les différents éléments étudiés, l'analyse faisant appel à chaque facteur séparément montre des relations tantôt positives tantôt négatives.

Certains de ces résultats confirment même les relations de synergisme ou d'antagonisme cités par de nombreux auteurs.

Le phosphore quant à lui montre des corrélations avec le zinc, le calcium et le potassium. Cette dernière relation varie avec la nature du sol, du végétal et du traitement utilisé.

Enfin, les différents résultats obtenus à l'issue de ce travail mettent en évidence l'importance des produits et dérivés phosphatés dans l'essor de l'agriculture. Cependant, il est souhaitable de mettre en pratique ces données au sein des stations expérimentales, afin de mieux cerner les relations avec les rendements.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABBOT, J.L. & T.C. TUCKER. 1973. - Persistence of manure in calcareous soil.
Soil Sci. Soc. Am. Proc. 37: 60-63. 7: 60-63.
- ADEPOJU, A.Y., P.F. PRATT & S.V. MATTIGOD. 1982.- Availability and extractability of phosphorus from soils having high residual phosphorus.
Soil Sci. Soc. Am. J. 46: N°3, Mai-Juin, 583-588.
- ALI HAIMOUD, A. 1983.- Etat de fertilité chimique de sols maraichers dans la région d'alger (STAOUELI).
Thèse Ing. INA. EL HARRACH, 105p.
- AMAR, B. 1988.- Les phosphates naturels dans la fertilisation des sols acides. Journées d'étude sur l'utilisation du phosphate naturel dans la nutrition végétale et animale.
E.N.FERPHOS Tebessa 8-10 mars : 21-33.
- ANDRE, M. 1988.- Phosphates naturels tendres et fumure d'entretien. Journées d'étude sur l'utilisation du phosphate naturel dans la nutrition végétale et animale.
E.N.FERPHOS Tebessa 8-10 mars: 35-39.
- AWAN, A.B. & al. 1971.- Etude comparative du phosphate naturel et du superphosphate comme sources de phosphore pour les cultures. *Rev. Agr. Cuba, 4, 1: 55-61.*
- BAEYENS, J. 1967.- Nutrition des plantes de culture ou physiologie appliquée des plantes agricoles de Louvain, Institut pédagogique. Ed. E. Nauwelarts, Louvain. 678p.
- BARRON, V., M. HERRUZO & J. TORRENT. 1988.- Phosphate Adsorption by aluminous hematites of different shapes.
Soil. Sci. Soc. Am. J. 52: 647-651.
- BARROW, N.J. 1974a.- On the displacement of adsorbed anions for soil: 2. Displacement of phosphate by arsenate.
Soil sci. 117: 28-33.

- BARROW, N.J. 1983.- A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil.
J. Soil sci. 34: 733-750.
- BARROW, N.J. & T.C. SCHAW. 1975.- The slow reactions between soil and anions: 2. effect of time and temperature on the decrease in phosphate concentration in the soil solution.
Soil Sci. 119,2: 167-177.
- BENAMAR, A. 1991.- Contribution à l'étude des conditions d'utilisation du phosphogypse dans la mise en valeur des sols salés des plaines du bas Cheliff.
Thèse Magister, INA, El-Harrach. 139p.
- BENCHAAAR, S.E. 1987.- Etude expérimentale sur l'assimilabilité des rejets phosphatés (Djebel Onk) en agriculture.
Thèse Ing. Agr. INA. El Harrach. 82p.
- BLANCHET, R., M BOSCH, N.GELFI & A. HILAIRE . 1971.- Veillissement des engrais phosphatés dans le sol et conduite de la fertilisation .*Ann.Agr.* 22 (6) 687-713.
- BOSCH, M. 1975.- La plante dans le sol: Dynamisme de l'alimentation phospho-potassique. In *Purpan.* n°96, juillet - septembre. 297-3077.
- BOUDJEMAA, A. 1988.- Les phosphates naturels dans la fertilisation des sols acides. *IM. Phos. journées d'étude sur l'utilisation du phosphate naturel dans la nutrition végétale et animale. Tebessa, 8-10 mars.* 21-33.
- BOWMAN, R.A. & C.V. COLE. 1978.- Transformations of organic phosphorus substrates in soils as evaluated by NaHCO_3 extraction.
Soil Sci. 125: 49-54.
- BROWN, J.L. 1981a.- Calcium phosphate precipitation: Identification of kinetic parameters in aqueous limestone suspensions.
Soil Sci. Soc. Am. J. 45: 475-477.

- BROWN, J.L. 1981b.- Calcium phosphate precipitation: Effects of common and foreign ions on hydroxyapatite crystal growth.
Soil Sci. Soc. Am. J. 45 : 485-486.
- CASTRO, C.L. & D.E. ROLSTRON. 1977.- Organic phosphate transport and hydrolysis in soil: theoretical and experimental evaluation.
Soil Sci. Soc. Am. J. 41 : 1085-1092.
- CHIEN, S.H. & L.L. HAMMOND. 1978.- A comparaison of various laboratory methodes for predicting the agronomic potential of phosphate rocks for direct application.
Soil Sci. Soc. Am. J. 42 : 935-939.
- CHIEN, S.H., W.R. CLAYTON, & G.H. McCLELLAN. 1980.- Kinetics of dissolution of phosphate rocks in soils.
Soil. Sci. Soc. Am. J. 44 : 260-264.
- CHIEN, S.H., F. ADAMS., F.E. KHASAWNEH & J. HENAO. 1987.- Effects of combinations of triple superphosphate and a reactive phosphate rock on yield and phosphorus uptake by corn.
Soil Sci. Soc. Am. J. 51 : 1656-1658.
- COX, F.R., E.J. KAMPRATH & R.E. McCOLLUM. 1981.- A descriptive model of soil test nutrient levels following fertilization.
Soil Sci.Soc. Am. J. 45 : 529-532.
- DAJOZ, R. 1982.- Précis d'écologie. Gauthier-villars. 4^e édition.
504p.
- DAOUD, Y. 1988.- Possibilités d'utilisation des phosphates naturels dans la mise en valeur des sols salés.
I.M.Phos. Journée d'étude sur l'utilisation du phosphate naturel dans la nutrition végétale et animale.
Tebessa du 8 au 10 mars. 53-65.
- DEMOLON, A. 1966.- Principes d'agronomie, tome 1. Dynamique du sol.
Ed. Masson, Paris. 520p.

- DEMOLON, A. 1968.- La dynamique du sol. Ed. Masson, Paris. 520p.
- DEMOLON, A. & A. MARQUIS. 1961.- Le phosphore et la vie.
Ed. Que sais-je, N° 373. 127p.
- DIBBE, B. 1977.- Fundamentals in soil chemistry and fertility.
Damas, 210p.
- DIEHL, R. 1975.- Agriculture générale. Ed. J. B. Baillière. 396p.
- DJALEM, M. 1988.- Présentation des résultats d'essai sur
l'utilisation du rejet de phosphate.
*Journées d'étude sur l'utilisation du phosphate naturel
dans la nutrition végétale et animale. EN Ferphos.
Tebessa du 8 au 10 mars. 125-128.*
- DUCHAUFOR, Ph. 1970.- Précis de pédologie. 3^{ème} édition Masson.
Paris. 481p.
- DUPUY, M. 1972.- La tomate des serres.
Etude F.N.C.E.T.A, N°1886, Février.
- DUTIL, P. 1976.- La fertilité phosphatée des sols calcaires.
Annales de l'I.N.A.(El-Harrach), Vol. VI, N°2, pp 75-80.
- ERNANI, P.R. & S.A. BARBER. 1990.- Comparaison of P-availability from
monocalcium and diammonium phosphates using a mechanistic
nutrient uptake model.
Fertilizer Research 22: pp 15-20.
- FETTAKA, A. 1986.- Dynamique et fractionnement des rejets de phosphate
dans un sol rouge. Thèse. Ing. Agr. INA EL HARRACH, 39p.
- FIXEN, P.E. & A.E. LUDWICK. 1982a.- Residual available P in near
neutral and alkaline soils: I. Solubility and capacity
relationships.
Soil Sci.Soc. Am. J. 46: 332-334.

- GACHON, L. 1982.- Le phosphore et la vie végétale.
Comptes rendus des séances de l'académie d'agriculture
de France. *Tome 68. Numero spécial N°4.*
Séance du 10 février, 308-326.
- GAUCHER, G. 1968.- Traité de pédologie agricole. Le sol et ses
caractéristiques agronomiques. *Ed. Dunod. Paris, 569p.*
- GERDAT, 1977.-La carence en phosphore des sols intertropicaux et
ses méthodes d'appréciation.
1^{er} congrés international sur les composés phosphorés.
- GERVY, R. 1970. - Les phosphates et l'agriculture.
Ed. Dunod. Paris. 164p.
- GHANEM, S.A. & D.S. MIKKELSEN. 1988.- Sorption of zinc on iron
hydrous oxide. *Soil Sci. 146 : 15-21.*
- GOLDBERG, S & G. SPOSITO.1984.- A chemical model of phosphate
adsorption by soils: II. Noncalcareous soils.
Soil Sci. Soc. Am. J. 48 : 779-789.
- GROS, A. 1979.- Engrais, guide pratique de la fertilisation.
7^{ème} ed, maison rustique, Paris. 382p.
- GUERIN, H. 1988.- Le phosphore dans l'alimentation des ruminants
tropicaux : risques de carences, effet de la
fertilisation des fourrages et de la complémentation,
possibilité d'utilisation des phosphates naturels.
*Séminaire internationale sur l'utilisation des
phosphates naturels dans l'agriculture et l'élevage.*
E.N.Ferphos. 8-11 mars, 117-119.
- HALFAOUI, F. 1976.- Le régime des phosphates dans les sols
algériens.
Annales de l'INA (EL-HARRACH), Vol VI, N°2. pp 105-118.

HALFAOUI, F. 1988.- Utilisation des phosphates naturels en Algérie et résultats d'essais.

Journées d'étude sur l'utilisation des phosphates naturels dans la nutrition végétale et animale. Tebessa 8-11 mars, 157-176.

HALITIM, A., A. MESROUK. & H. ZOUGGARI. 1986.- Projet de programme de recherche sur l'utilisation des rejets de l'industrie phosphatière (phosphogypse et phosphate naturel) en agriculture. 37p.

HALM, B.J , J.W.B. STEWART & R.L. HALSTEAD. 1972.- The phosphate cycle in a native grassland ecosystem. In isotopes and radiation in soil.

Plant relationships including forestry, International Atomic Energy Association (IAEA), Vienna, Austria, 571-586.

*

HARRISON, R.B. & F. ADAMS. 1987.- Solubility characteristics of residual phosphate in a fertilized and limed ultisol. *Soil Sci. Soc. Am. J. 51 : 963-969.*

HELLER, R. 1968.- Cours de physiologie végétale. 1^e partie , nutrition. 155p. Ed. Masson.

HELLER, R. 1981. - Physiologie végétale. 1^e partie nutrition. Abrégés. 2^e Ed. Masson. 244p.

HOLFORD, I.C.R. 1980.- Greenhouse evaluation of four phosphorus soil tests in relation to phosphate buffering and labile phosphate in soils. *soil Sci. Soc. Am. J. 44 : 555-559.*

HOLFORD, I.C.R. & G.E.G. MATTINGLY. 1975a.- The high-and low-energy phosphate absorbing surfaces in calcareous soils. *J. Soil Sci. 26 : 407-417.*

* HAMADI, M. 1971.- De quelques problèmes de recherche dans le domaine maraîcher en Algérie. In semaine d'étude des problèmes méditerranéens, 496-498.



HOLFORD, I.C.R. & G.E.G. MATTINGLY. 1975b.- Surface area of calcium carbonate in soils.

Geoderma 13 : 247-255. 247-255.

HOOKE, M.L., G.A. PETERSON., D.H. SANDER. & L.A. DAIGGER. 1980.- Phosphate fractions in calcareous soils as altered by time and amounts of added phosphate.

Soil Sci. Soc. Am. J. 44 : 269-277.

IBRAHIM, H.S. & P.F. PRATT. 1982.- Effects of rate of application and time on phosphorus sorption by soils.

Soil Sci. Soc. Am. J. 46 : 926-928.

IGNAZI, J.C. 1982.- Les réserves mondiales en phosphates et la consommation d'engrais phosphatés.
Tome 68- N°4 spécial- Séance du 10 février .327-339.
Comptes rendus des séances de l'académie d'agriculture de France.

IGNAZI, J.C. 1983.- Les réserves mondiales en phosphates et la consommation d'engrais phosphatés.

BTI N°376-janvier. 35-43.

JONES, C.A., A.N. SHARPLEY. & J.R. WILLIAMS. 1984.- A simplified soil and phosphorus model: III testing.

Soil Sci. Soc. Am. J 48:N°4-juillet-août 810-813.

JONES, C.A., C.V. COLE., A.N. SHARPLEY. & J.R. WILLIAMS. 1984.- A simplified soil and phosphorus model: I. documentation.

Soil Sci. Soc. Am. J. 48 : N°4 - juillet-août. 800-805.

JUNGE, A & W. WERNER. 1989.- Investigations on interactions of phosphorus compounds in partially acidulated phosphate rock and fertilizer effectiveness.

Fertilizer research 20 : 129-134.

KHALID, R.A., J.R. PATRICK. & R.D. DELAUNE. 1977.- Phosphate adsorption characteristics of flooded soils.

Soil Sci. Soc. Am. J. 41 : 305-310

- REZIG, A. 1978. -Dynamique et formes du phosphore dans quelques profils types des sols de la Mitidja.
These ing.I.N.A. El-Harrach. 65p.
- RUSSELL, J.S., E.J. KAMPRATH & C.S. ANDREW. 1988.- Phosphorus sorption of subtropical acid soils as influenced by the nature of the cation suite.
Soil Sci. Soc. Am. J. 52 : 1407-1410.
- RYAN, J., D. CURTIN. & M.A. CHEEMA. 1985a.- Significance of iron oxides and calcium carbonate particle size in phosphate sorption by calcareous soils.
Soil Sci. 49 : N°1. 74-76.
- RYAN, J., H.M. HASAN., M. BAASIRI. & H.S. TABBARA. 1985b.- Availability and transformation of applied phosphorus in calcareous lebanese soils.
Soil Sci. J. 49 : 1215-1220.
- RYDEN, J.C., J.R. McLAUGHLIN. & J.K. SYERS. 1977.- Time dependent sorption of phosphate by soils and hydrous ferric oxides.
J. Soil Sci. 28 : 585-595.
- RYDEN, J.C., J.K. SYERS & R.W. TILLMAN. 1987. - Inorganic anion sorption and interactions with phosphate sorption by hydrous ferric oxide gel.
J. Soil Sci. 38 : 211-217.
- RYSER, J.P. 1986.- Le phosphore.
Revue horticole suisse. Vol. 49. N°5. Mai.III-115.
- SAH, R.N. & D.S. MIKKELSEN. 1986a.- Transformations of inorganic phosphorus during flooding and draining periods of soil.
Soil Sci. Soc. Am. J. 50 : 62-67.
- SAH,R.N. & D. S. MIKKELSEN. 1989.- Phosphorus behavior in flooded-drained soils. I. Effects on phosphorus sorption.
Soil Sci. Soc. Am. J. 53 : 1718-1722.

- KHELLAF, S. 1981.- Contribution à l'étude de l'utilisation des phosphates naturels dans la fertilisation du sol. *Thèse Ing. Agr. El-harrach. 57p.*
- KOUIDER, M. 1974.- Coefficient d'utilisation de quelques éléments assimilables des scories THOMAS mesuré par une technique isotopique. *Thèse Doctorat 3eme cycle. Montpellier. 67p.*
- KOVAR, J.L. & S. A. BARBER. 1988.- Phosphorus supply characteristics of 33 soils as influenced by seven rates of phosphorus addition. *Soil Sci. Soc. Am. J. 52 : 160-165.*
- KUO, S. 1985.- Dosage du phosphore dans le sol, importance du pouvoir fixateur phosphore. *Agr. Abstr. Am. Soc. Agr. Decembre, 149.*
- KUO, S. 1990.- Phosphate sorption implications on phosphate soil tests and uptake by corn. *Soil Sci. Soc. Am. J. 54:131-135.*
- KUO, S. & E.G. LOTSE. 1974.- Kinetics of phosphate adsorption and desorption by hematite and gibbsite. *Soil Sci. 116 : 400-406.*
- KUO, S., E.J. JELLUM. & W.L. PAN. 1988.- Influence of phosphate sorption parameters of soils on desorption of phosphate by various extractants. *Soil Sci. Soc. Am. J. 52 : 974-979.*
- LEON, L.A., W.E. FENSTER. & L. HAMMOND. 1981.- Relative agronomic effectiveness of twelve finely ground phosphate rocks from Brasil, Colombia, Peru and Venezuela. *Am. Soc. Agr. Agronomy abstracts. p 43.*
- LEYMONIE, J.P. & L. WEBER. 1986.- Phosphates: le point sur la législation et leur valeur agronomique. *Revue Negoce de l'approvisionnement et de la collecte. N° 12. Novembre - décembre. 296-299.*

- LIBOIS, A. 1966 - Le phosphore. *Revue agricole de France*.
N° 52. Juin. 19p.
- LOMBAERT, V. 1987.- Miro cultures. Méthodes STANFORD- DE MENT.
Dossiers Agr. d'Aspach, 2, 59-86, Centre de recherches
SCPA F 68700 Aspach-le-bas.
- LOPEZ-HERNANDEZ, D., G. SIEGERT & J. VRODRIGUEZ. 1986.- Competitive
adsorption of phosphate with malate and oxalate by
tropical soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50 : 1460-1462.
- MANSELL, R.S., H.M. SELIM, P. KANCHANASUT., J.M. DAVIDSON. &
J.G.A. FISKELL. 1977. - Experimental and simulated
transport of phosphorus through sandy soils.
Water. Res. 13 : 189-194.
- MANSELL, R.S., P.J. Mc KENNA., E. FLAIG. & M. HALL. 1985.- Le
mouvement du phosphate dans des colonnes de sol sableux
irrigués avec de l'eau usée.
Soil Sci. 140(1). 59-68.
- MEEK, B.D. , L.E. GRAHAM. , T.J. DONOVAN & K.S. MAY BERRY. 1979.-
Phosphorus availability on calcareous soil after high
loading rates of animal manure.
Soil Sci. Soc. Am. J. 43 : 741-743.
- MOULE, C. 1980.- Céréales: phytotechnie spéciale, Bases scientifiques
des principales espèces de grandes cultures en France.
Maison rustique. 318p.
- MOYSE, A. 1982.- Les activités physiologiques et le phosphore.
Comptes rendus des séances de l'académie d'agriculture
de France.
Tome 68. N° 4 spécial. Séance du 10 février. 282-289.
- MUNNS, D.N., R.L. FOX. 1976.- The slow reaction which continues
after phosphate adsorption. Kinetics and
equilibrium in some tropical soils. *Soil Sci. Soc. Am.*
J. 40 : 46-51.

- ONUDI, 1985.- Série: mise au point et transfert des techniques.
N°13. *Manuel des engrais. Nations unies. Newyork.*
- PAGEL, H., R. SCHIKOWSKI, R. METZ., H. BENKENSTEIN., W. KRÜGER. & JKIELSZEWSKI. 1985.- L'effet de la vidange et de refus de compost sur l'état de phosphore d'un sol sableux. *Archiv für acker. Und pflanzenbau und bodenkunde.* 29 (5) 285-293.
- PETERS, J.R. 1983.- The effect of phosphorus and nitrogen fertilizer on the relationship between soil salinity levels and the grain yield and protein content of barley grown on stubble. *Can. J. Soil Sci.*63: 705-718.
- PHAM, T. N. N., L. NATR & S.FIALOVA. 1981.- Changes in photosynthetic rate of spring barley induced by removal of nitrogen or phosphorus deficiency. *Photosynthetica* 15. 216-220.
- QUEMENER, J. 1968.- Exemples d'application de la méthode de STANFORD-DE MENT à des problèmes de fertilisation phosphatée. *Ann. Agr.* 19 (5) 589-604.
- RAJAN, S.S.S. & R.L. FOX. 1972.- Phosphate adsorption by soils
Commun.
Soil and plant analysis 3 : 493-504.
- RAJU, G.S.N. 1988.- Influence du calcaire sur le comportement des rejets phosphatés dans le sol.
Journées d'étude sur l'utilisation du phosphate naturel dans la nutrition végétale et animale.
*Tebessa du 8 au 10 mars.*75-80.
- RAO, P.S.C. & J.M. DAVIDSON. 1979.- Adsorption and movement of selected pesticides at high concentrations in soils.
Water Res. 13 : 375-380.

- SAH, R.N., D. SMIKKELSEN. & A.A. HAFEZ. 1989.- Phosphorus behavior in flooded-drained soils. II. Iron transformation and phosphorus sorption.
Soil Sci. Soc. Am. J. 53 : 1723-1729
- SAMPLE, E.C., R.J. SOPER. & G.J. RACZ. 1980.- Reactions of phosphate fertilizers in soils.
American society of agronomy, crop science. 263-310.
- SANDER, D.H & B. EGHBALL. 1988.- Effect of fertilizer phosphorus particle size on phosphorus fertilizer efficiency.
Soil Sci. Soc. Am. J. 52 : 868-873.
- SANFOURCHE, A. 1947.- Les engrais phosphatés. *Ed. Dunod. Paris.*
- SCHNEIDER, A. 1992.- Contrôle des engrais constitués de scories Thomas, de phosphore naturel et de chlorure de potassium. 1-Solubilité citrique.
Dossiers agronomiques d'Aspach-le bas. N°5, octobre, 95-106.
- SCHWAB, A.P. 1989.- Manganese-phosphate solubility relationships in an acid soil.
Soil Sci. Soc. Am. J. 53: 1654-1660.
- SHARPLEY, A.N. 1982.- A prediction of the water extractable phosphorus content of soil following a phosphorus addition.
J. Environ. Qual. 11 : 166-170.
- SHARPLEY, A.N., L. R. LAHUJA., M. YAMAMOTO. & R. G. MENZEL. 1981.- The kinetics of phosphorus desorption from soil.
Soil Sci. Soc. Am. J. 45 : 493-496.
- SHARPLEY, A.N., D. CURTIN. & J. K. SYERS. 1988.- Changes in water-extractability of soil inorganic phosphate induced by sodium saturation.
Soil Sci. Soc. Am. J. 52 : 637-640.

- SHARPLEY, A.N., U. SINGH., G. UEHARA. & J. KIMBLE. 1989.- Modeling soil and plant phosphorus dynamics in calcareous and highly weathered soils.
Soil Sci. Soc. Am. J. 53 : 153-158.
- SIFAOUI. 1980.- Utilisation du phosphate naturel dans les sols acides du nord de la Tunisie. I.M. Phos.
Journées d'étude sur l'utilisation du phosphate naturel dans la nutrition végétale et animale.
Tebessa du 8 au 10 mars. 40-50.
- SINGH, B.B., J.P. JONES. 1976 . - Phosphorus sorption and desorption characteristics of soil as affected by organic residus.
Soil Sci. Soc. Am. J. 40 : 389-394.
- SINGH, A. et CHHABRAR ABROL, I.P. 1978 - Effect of fluorine and phosphorus on the yield and chemical composition of rice (*Oryza sativa*) grown in soils of two sodicities.
Soil Sci. Vol. 127 N°2. pp86-93.
- SMILLIE, G.W., D. CURTIN. & J.K. SYERS. 1987.- Influence of exchangeable calcium on phosphate retention by weakly acid soils.
Soil Sci. Soc. Am. J. 51 : 1169-1172.
- SOLIS, P. & J. TORRENT. 1989.- Phosphate sorption by calcareous vertisols and inceptisols of Spain.
Soil Sci. Soc. Am. J. 53 : 456-459.
- STOWASSER, F.W. 1991.- Phosphate rock.
Annual report minerals yearbook. U.S. Department of the interior bureau of mines.
- TARDIEU-ROCHE. 1966.- Interaction phosphate naturel et microflore du sol.
Ann. Agr. Vol. 17. 41p.
- TORRENT, J. 1986. - Rapid and slow phosphate sorption by mediterranean soils: effect of iron oxides.
Soil Sci. Soc. Am. J. 50 : 78-82.

- TRAINA, S.J., G. SPOSITO., G.R. BRADFORD & U. KAFKAFI. 1987.
-Kinetic study of citrate effects on orthophosphate solubility in an acidic, montmorillonitic soil.
Soil Sci. Soc. Am. J. 51 : 1483-1487.
- TRUONG, B. 1985.- Essai d'une approche raisonnée de l'utilisation des phosphates naturels en agriculture.
Table ronde sur le développement de l'industrie des phosphates et des engrais phosphatés dans les pays en développement. Gafsa, Tunisie. 18-22 NOV. pp12.
- TRUONG, B. 1988.- Conditions d'efficacité des phosphates naturels dans la fertilisation des sols.
Journées d'étude sur l'utilisation de phosphate naturel dans la nutrition végétale et animale. 8-10 mars, E.N.FERPHOS, 5-18.
- VELAYUTHAM, 1980.- Problèmes de la fixation des phosphates par les minéraux et les colloïdes du sol.
Phosphore et agriculture, ISMA, N°77 mars, 34^{ème} année. pp 31-45.
- WHITE, R.E. & A.W. TAYLOR. 1977.- Effect of pH on adsorption and isotopic exchange in acid soils at low and high additions of soluble phosphate.
J. Soil Sci. 28 : 48-61.
- WILLIAMS, J.D.H., T. MAYER & J.O. NRIAGU. 1980.- Extractability of phosphorus from phosphate minerals common in soils and sediments.
Soil Sci. Soc. Am. J. 44 : 462-465.

ANNEXE 1

Solutions nutritives utilisées (d'après LOMBART, 1987).

Produits	Concentration de produit en g/l			
	K	P	Mg	Oligo-éléments
<u>Solution appelée P</u>				
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	4,65	0	4,65	4,65
<u>Solution appelée B</u>				
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	5,27	1,76	5,27	3,52
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2,56	1,28	0	2,56
K_2SO_4	0	0	1,34	0
KNO_3	0	0,776	0	1,552
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,04	0,02	0,04	0,04 ou 0
$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0,04	0,02	0,04	0,04 ou 0
$(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,04	0,02	0,04	0,04 ou 0
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0,04	0,02	0,04	0,04 ou 0
$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	0,002	0,001	0,002	0,002 ou 0

selon l'élément à tester

Elements	Concentration d'élément en mg/l			
	K	P	Mg	Oligo-éléments
N	625	316	625	633
P	402	0	402	402
K	0	300	601	600
Ca	894	299	894	597
Mg	253	126	0	253
Na	597	0,1	597	597
S	350	175	264	343 à 350
Fe	8	4	8	8 ou 0
Mn	13	7	13	13 ou 0
Zn	12	6	12	12 ou 0
Cu	10	5	10	10 ou 0
B	0,2	0,1	0,2	0,2 ou 0

selon l'élément à tester

ANNEXES

ANNEXE 2

EXEMPLE DE CALCULS DES SOLUBILITEES MESUREES ET RELATIVES.

Soit le mélange PN/PG à la dose 32/8. le calcul de la solubilité citrique mesurée (SC) se fait selon les étapes suivantes:

100g de PN renferment 29g de P205

32g de PN renferment donc 9,28g de P205.

100g de PG renferment 1,5g de P205

8g de PG renferment donc 0,12g de P205.

Dans le mélange PN/PG à la dose 32/8 il y'a donc $(9,28+0,12)$ g de P205, soit 9,40g de P205.

Ce mélange 32/8 a une masse pondérale de 40g, ce qui signifie que le mélange 32/8 contient 9,40g DE P205 /40g de mélange.

La solubilité citrique obtenue pour le mélange 32/8 =9966,67 mg P205 /l ; soit 996,667mg/100ml extrait à partir de 5g de mélange.

Par ailleurs, nous savons que 40g de mélange renferment 9,40g de P205 ce qui donne 1,175g de P205 / 5g de mélange ou encore 23,5% de mélange.

Pratiquement, nous avons obtenu 996,667 mg de P205 à partir de 5g de mélange, soit 19933,2 mg P205 /100g de mélange.

La solubilité citrique mesurée (SC) serait donc égale à 19,933.

La solubilité citrique mesurée relative (SCR)= $19,933/23,5=0,848$.

La solubilité citrique mesurée relative (SCR)=84,8%.

D'autre part, le PN seul a donné une solubilité dans l'acide citrique de 1500ppm soit donc $1500.100/10.5.1000=3\%$.

Le PG seul a donné une solubilité dans l'acide citrique égale à 1100 ppm, soit $1100.100/10.5.1000=2,2\%$.

La solubilité citrique théorique (SC théorique) est donc calculée ainsi :

$$SC \text{ théorique} = (32/40).3 + (8/40).2,2 = 2,84\%$$

$$SCR \text{ théorique} = 2,84.100/23,5 = 12,08\%$$

REMARQUE : les calculs sont les mêmes pour les solubilités dans l'eau (SE) et dans le citrate d'ammonium (SCA), pour les mélanges PN/PG et pour les mélanges RD/PG.

ANNEXE 3

Moyennes facteur végétal pour l'azote (% de MS)

Végétal	Moyennes
Vesce	0,90
Orge	0,80

Moyennes facteur sol pour l'azote (% de MS)

Traitements	Moyennes
C PN	0,87
C NG	0,80
C TSP	0,85
C PG	0,76
C (TEMOIN)	0,92
S NG	0,92
S TSP	0,93
S PG	0,77
S PN	0,87
S (TEMOIN)	0,80

ANNEXE 3 bis

Moyennes facteur interaction sol x végétal pour l'azote
(% de MS)

Traitements	Vesce	Orge
C (TEMOIN)	0,95	0,90
C PN	1,01	0,73
C PG	0,92	0,59
C TSP	0,76	0,95
C NG	0,90	0,70
S (TEMOIN)	0,90	0,70
S PN	0,87	0,87
S PG	0,92	0,62
S TSP	0,87	0,98
S NG	0,92	0,92

ANNEXE 4

Moyennes facteur interaction sol x végétal pour le potassium
(% de MS)

Traitements	Vesce (10 ⁻²)	Orge (10 ⁻²)
C (TEMOIN)	75	60
C PN	80	181
C PG	45	129
C TSP	75	60
C NG	80	120
S (TEMOIN)	60	65
S PN	65	78,2
S PG	60	100
S TSP	35	80
S NG	55	60

ANNEXE 5

Moyennes facteur végétal pour le magnésium (% de MS)

Végétal	Moyennes (10^{-3})
Vesce	439,20
Orge	409,50

ANNEXE 6

Moyennes facteur végétal pour le cuivre (% de MS)

Végétal	Moyennes (10^{-6})
Vesce	1872,00
Orge	1576,00

Moyennes facteur interaction sol x végétal pour le cuivre
(% de MS)

Traitements	Vesce (10^{-6})	Orge (10^{-6})
C (TEMOIN)	2880,00	1240,00
C FN	1100,00	1380,00
C PG	3260,00	1350,00
C TSP	2660,00	3030,00
C NG	2980,00	2750,00
S (TEMOIN)	1240,00	1480,00
S FN	1720,00	590,00
S PG	1360,00	1480,00
S TSP	630,00	1230,00
S NG	890,00	1230,00

ANNEXE 7

Moyennes facteur végétal pour le zinc (% de MS)

Végétal	Moyennes (10^{-5})
Vesce	486,00
Orge	402,00

Moyennes interaction Sol x Végétation pour le zinc (% de MS)

Traitements	Vesce (10^{-5})	Orge (10^{-5})
C (TEMOIN)	600,00	500,00
C PN	420,00	200,00
C PG	640,00	180,00
C TSP	600,00	620,00
C NG	400,00	420,00
S (TEMOIN)	500,00	400,00
S PN	440,00	220,00
S PG	520,00	480,00
S TSP	200,00	400,00
S NG	540,00	600,00

ANNEXE 8

Moyennes facteur sol pour le manganèse (% de MS)

Traitements	Moyennes (10^{-4})
C PN	100,00
C NG	80,00
C TSP	60,00
C PG	40,00
C (TEMOIN)	40,00
S NG	100,00
S TSP	80,00
S PG	80,00
S PN	60,00
S (TEMOIN)	40,00

Moyennes facteur interaction sol x végétal pour le manganèse
(% de MS)

Traitements	Vesce (10^{-4})	Orge (10^{-4})
C (TEMOIN)	80,00	0,00
C PN	120,00	80,00
C PG	40,00	40,00
C TSP	00,00	120,00
C NG	40,00	120,00
S (TEMOIN)	00,00	80,00
S PN	40,00	80,00
S PG	40,00	120,00
S TSP	40,00	120,00
S NG	80,00	120,00

ANNEXE 9

***** MATRICE DE CORRELATIONS *****

CARACTERISTIQUES DU FICHIER : C:CTD
TITRE :

NOMBRE D'OBSERVATIONS : 5 NOMBRE DE VARIABLES : 9

MATRICE DE CORRELATIONS TOTALES

	NO2	P2O5	K	CA	MG	NA	CU	ZN	MN
NO2	1.000								
P2O5	0.000	1.000							
K	0.507	-0.298	1.000						
CA	0.326	-0.386	-0.029	1.000					
MG	0.000	-0.403	0.563	-0.622	1.000				
NA	0.973	0.058	-0.598	0.109	0.180	1.000			
CU	-0.957	0.118	-0.426	-0.586	0.191	-0.867	1.000		
ZN	-0.841	-0.059	-0.843	-0.023	-0.292	-0.907	0.728	1.000	
MN	0.645	-0.408	0.917	0.368	0.272	0.644	-0.666	-0.821	1.000

***** MATRICE DE CORRELATIONS *****

CARACTERISTIQUES DU FICHIER : C:CPNO
TITRE :

NOMBRE D'OBSERVATIONS : 5 NOMBRE DE VARIABLES : 9

MATRICE DE CORRELATIONS TOTALES

	NO2	P2O5	K	CA	MG	NA	CU	ZN	MN
NO2	1.000								
P2O5	0.491	1.000							
K	-0.541	0.044	1.000						
CA	0.250	0.191	0.597	1.000					
MG	-0.246	0.443	0.911	0.673	1.000				
NA	0.029	0.788	0.410	0.330	0.702	1.000			
CU	-0.313	-0.904	-0.175	-0.302	-0.545	-0.954	1.000		
ZN	-0.408	-0.757	-0.452	-0.612	-0.712	-0.539	0.593	1.000	
MN	0.612	-0.312	-0.668	-0.102	-0.712	-0.773	0.556	0.167	1.000

***** MATRICE DE CORRELATIONS *****

CARACTERISTIQUES DU FICHIER : C:CP60

TITRE :

NOMBRE D'OBSERVATIONS : 5 NOMBRE DE VARIABLES : 9

MATRICE DE CORRELATIONS TOTALES

	NO2	P205	K	CA	MG	NA	CU	ZN	MN
NO2	1.000								
P205	0.076	1.000							
K	-0.411	0.321	1.000						
CA	-0.959	-0.091	0.369	1.000					
MG	-0.458	-0.879	-0.271	0.481	1.000				
NA	0.385	0.303	0.636	-0.429	-0.623	1.000			
CU	-0.286	-0.951	-0.317	0.307	0.979	-0.524	1.000		
ZN	-0.167	0.497	-0.444	0.197	-0.167	-0.660	-0.294	1.000	
MN	0.919	0.187	-0.038	-0.936	-0.612	0.718	-0.440	-0.408	1.000

***** MATRICE DE CORRELATIONS *****

CARACTERISTIQUES DU FICHIER : C:CTBPO

TITRE :

NOMBRE D'OBSERVATIONS : 5 NOMBRE DE VARIABLES : 9

MATRICE DE CORRELATIONS TOTALES

	NO2	P205	K	CA	MG	NA	CU	ZN	MN
NO2	1.000								
P205	0.547	1.000							
K	-0.363	-0.408	1.000						
CA	0.594	0.395	0.000	1.000					
MG	-0.136	-0.233	0.921	0.388	1.000				
NA	-0.363	-0.408	1.000	0.000	0.921	1.000			
CU	0.146	0.000	0.676	0.734	0.910	0.676	1.000		
ZN	-0.363	-0.408	0.722	0.430	0.854	0.722	0.835	1.000	
MN	-0.474	-0.612	-0.167	0.000	-0.120	-0.167	-0.066	0.389	1.000

***** MATRICE DE CORRELATIONS *****

CARACTERISTIQUES DU FICHIER : C:CNB0
TITRE :

NOMBRE D'OBSERVATIONS : 5 NOMBRE DE VARIABLES : 9

MATRICE DE CORRELATIONS TOTALES

	NO2	P205	K	CA	MG	NA	CU	ZN	MN
NO2	1.000								
P205	-0.204	1.000							
K	0.551	0.225	1.000						
CA	0.000	0.040	0.087	1.000					
MG	-0.116	0.059	-0.145	-0.990	1.000				
NA	0.560	0.025	0.947	0.334	-0.407	1.000			
CU	-0.879	-0.018	-0.846	0.152	-0.053	-0.768	1.000		
ZN	-0.740	-0.121	-0.969	-0.070	0.151	-0.929	0.942	1.000	
MN	0.000	0.659	0.380	-0.663	0.703	0.064	-0.352	-0.306	1.000

***** MATRICE DE CORRELATIONS *****

CARACTERISTIQUES DU FICHIER : C:ST0
TITRE :

NOMBRE D'OBSERVATIONS : 5 NOMBRE DE VARIABLES : 9

MATRICE DE CORRELATIONS TOTALES

	NO2	P205	K	CA	MG	NA	CU	ZN	MN
NO2	1.000								
P205	0.000	1.000							
K	0.000	0.593	1.000						
CA	0.000	0.000	-0.228	1.000					
MG	0.000	0.791	0.875	0.000	1.000				
NA	0.000	0.807	0.868	-0.373	0.919	1.000			
CU	0.000	0.791	0.875	0.000	1.000	0.919	1.000		
ZN	0.000	0.395	0.375	-0.913	0.250	0.612	0.250	1.000	
MN	0.000	0.323	0.408	0.745	0.612	0.250	0.612	-0.612	1.000

***** MATRICE DE CORRELATIONS *****

CARACTERISTIQUES DU FICHIER : C:SPND
TITRE :

NOMBRE D'OBSERVATIONS : 5 NOMBRE DE VARIABLES : 9

MATRICE DE CORRELATIONS TOTALES

	NO2	P2O5	K	CA	MG	NA	CU	ZN	MN
NO2	1.000								
P2O5	0.399	1.000							
K	-0.344	-0.923	1.000						
CA	0.152	-0.103	0.474	1.000					
MG	0.165	-0.331	0.576	0.786	1.000				
NA	0.134	-0.485	0.736	0.843	0.959	1.000			
CU	-0.329	0.193	-0.515	-0.928	-0.661	-0.795	1.000		
ZN	0.255	0.399	-0.688	-0.823	-0.474	-0.652	0.820	1.000	
MN	-0.295	0.527	-0.389	0.092	-0.481	-0.431	-0.028	-0.295	1.000

***** MATRICE DE CORRELATIONS *****

CARACTERISTIQUES DU FICHIER : C:SPGD
TITRE :

NOMBRE D'OBSERVATIONS : 5 NOMBRE DE VARIABLES : 9

MATRICE DE CORRELATIONS TOTALES

	NO2	P2O5	K	CA	MG	NA	CU	ZN	MN
NO2	1.000								
P2O5	0.000	1.000							
K	0.322	-0.695	1.000						
CA	-0.098	0.000	0.606	1.000					
MG	0.805	0.000	0.198	-0.221	1.000				
NA	0.724	0.648	-0.290	-0.166	0.471	1.000			
CU	0.116	-0.023	0.654	0.889	0.199	-0.107	1.000		
ZN	-0.753	-0.554	0.191	0.120	-0.409	-0.985	0.113	1.000	
MN	-0.102	0.645	-0.663	-0.328	0.356	0.230	-0.056	-0.057	1.000

***** MATRICE DE CORRELATIONS *****

CARACTERISTIQUES DU FICHIER : C:STSPD
TITRE :

NOMBRE D'OBSERVATIONS : 5 NOMBRE DE VARIABLES : 9

MATRICE DE CORRELATIONS TOTALES

	NO2	P2O5	K	CA	MG	NA	CU	ZN	MN
NO2	1.000								
P2O5	0.517	1.000							
K	-0.296	-0.913	1.000						
CA	0.593	0.232	-0.375	1.000					
MG	0.738	0.873	-0.850	0.670	1.000				
NA	-0.428	-0.976	0.980	-0.335	-0.892	1.000			
CU	0.667	0.342	0.067	-0.186	0.236	-0.134	1.000		
ZN	0.593	0.995	-0.875	0.250	0.886	-0.954	0.424	1.000	
MN	0.484	-0.490	0.612	0.408	-0.117	0.547	0.304	-0.408	1.000

***** MATRICE DE CORRELATIONS *****

CARACTERISTIQUES DU FICHIER : C:EMBO
TITRE :

NOMBRE D'OBSERVATIONS : 5 NOMBRE DE VARIABLES : 9

MATRICE DE CORRELATIONS TOTALES

	NO2	P2O5	K	CA	MG	NA	CU	ZN	MN
NO2	1.000								
P2O5	0.002	1.000							
K	0.257	0.906	1.000						
CA	-0.212	0.041	-0.309	1.000					
MG	0.110	0.977	0.875	0.180	1.000				
NA	0.930	-0.205	0.147	-0.502	-0.147	1.000			
CU	-0.052	0.694	0.759	-0.068	0.712	-0.137	1.000		
ZN	-0.379	0.380	0.484	-0.300	0.323	-0.286	0.854	1.000	
MN	0.479	-0.327	-0.102	-0.653	-0.408	0.662	-0.617	-0.527	1.000

***** MATRICE DE CORRELATIONS *****

CARACTERISTIQUES DU FICHIER : C:CTV
TITRE : C T VESCE

NOMBRE D'OBSERVATIONS : 5 NOMBRE DE VARIABLES : 9

MATRICE DE CORRELATIONS TOTALES

	NO2	P205	K	CA	MG	NA	CU	ZN	MN
NO2	1.000								
P205	-0.181	1.000							
K	0.861	-0.584	1.000						
CA	-0.477	0.537	-0.489	1.000					
MG	0.358	-0.586	0.334	-0.743	1.000				
NA	0.762	-0.762	0.933	-0.730	0.602	1.000			
CU	-0.694	-0.473	-0.291	0.332	-0.035	-0.188	1.000		
ZN	-0.088	0.077	-0.306	0.100	0.545	-0.190	0.124	1.000	
MN	-0.722	0.165	-0.645	0.758	-0.230	-0.662	0.716	0.527	1.000

***** MATRICE DE CORRELATIONS *****

CARACTERISTIQUES DU FICHIER : C:CPNW
TITRE :

NOMBRE D'OBSERVATIONS : 5 NOMBRE DE VARIABLES : 9

MATRICE DE CORRELATIONS TOTALES

	NO2	P205	K	CA	MG	NA	CU	ZN	MN
NO2	1.000								
P205	-0.838	1.000							
K	-0.265	-0.191	1.000						
CA	0.443	-0.742	0.049	1.000					
MG	0.359	-0.453	-0.245	0.667	1.000				
NA	-0.265	-0.191	1.000	0.049	-0.245	1.000			
CU	0.271	0.000	0.000	-0.511	-0.788	0.000	1.000		
ZN	0.910	-0.665	-0.210	0.132	-0.054	-0.210	0.645	1.000	
MN	0.490	-0.560	0.560	-0.059	-0.353	0.560	0.645	0.667	1.000

***** MATRICE DE CORRELATIONS *****

CARACTERISTIQUES DU FICHIER : C:SPGV
TITRE :

NOMBRE D'OBSERVATIONS : 5 NOMBRE DE VARIABLES : 9

MATRICE DE CORRELATIONS TOTALES

	NO2	P205	K	CA	MG	NA	CU	ZN	MN
NO2	1.000								
P205	0.306	1.000							
K	0.581	0.262	1.000						
CA	-0.539	0.584	-0.612	1.000					
MG	0.347	-0.567	0.577	-0.928	1.000				
NA	0.839	-0.162	0.843	-0.885	0.782	1.000			
CU	0.299	0.096	0.672	-0.443	0.688	0.530	1.000		
ZN	-0.605	-0.409	-0.210	-0.086	0.424	-0.177	0.543	1.000	
MN	0.685	0.527	0.408	0.063	-0.354	0.221	-0.349	-0.943	1.000

***** MATRICE DE CORRELATIONS *****

CARACTERISTIQUES DU FICHIER : C:STSPV
TITRE :

NOMBRE D'OBSERVATIONS : 5 NOMBRE DE VARIABLES : 9

MATRICE DE CORRELATIONS TOTALES

	NO2	P205	K	CA	MG	NA	CU	ZN	MN
NO2	1.000								
P205	-0.327	1.000							
K	-0.206	-0.397	1.000						
CA	0.344	-0.451	-0.253	1.000					
MG	0.232	0.591	-0.885	-0.183	1.000				
NA	-0.492	0.475	0.598	-0.769	-0.264	1.000			
CU	0.652	0.118	-0.286	-0.421	0.610	-0.053	1.000		
ZN	-0.336	0.310	0.612	-0.131	-0.542	0.732	-0.467	1.000	
MN	-0.206	-0.397	1.000	-0.253	-0.885	0.598	-0.286	0.612	1.000

***** MATRICE DE CORRELATIONS *****

CARACTERISTIQUES DU FICHIER : C:SNQV

TITRE :

NOMBRE D'OBSERVATIONS : 5 NOMBRE DE VARIABLES : 9

MATRICE DE CORRELATIONS TOTALES

	NO2	P205	K	CA	MG	NA	CU	ZN	MN
NO2	1.000								
P205	-0.231	1.000							
K	-0.356	-0.344	1.000						
CA	-0.356	-0.344	-0.250	1.000					
MG	-0.558	-0.539	0.361	0.813	1.000				
NA	0.106	0.249	0.299	-0.896	-0.683	1.000			
CU	-0.521	-0.504	0.197	0.900	0.985	-0.773	1.000		
ZN	0.509	-0.605	0.612	-0.408	-0.025	0.244	-0.138	1.000	
MN	0.980	-0.397	-0.250	-0.250	-0.391	0.000	-0.366	0.612	1.000

***** MATRICE DE CORRELATIONS *****

CARACTERISTIQUES DU FICHIER : C:SPNV

TITRE :

NOMBRE D'OBSERVATIONS : 5 NOMBRE DE VARIABLES : 9

MATRICE DE CORRELATIONS TOTALES

	NO2	P205	K	CA	MG	NA	CU	ZN	MN
NO2	1.000								
P205	0.492	1.000							
K	0.161	-0.487	1.000						
CA	-0.668	-0.596	-0.050	1.000					
MG	0.224	0.343	0.187	0.223	1.000				
NA	0.809	0.116	0.685	-0.634	0.163	1.000			
CU	0.978	0.370	0.358	-0.616	0.290	0.899	1.000		
ZN	-0.497	-0.219	-0.375	-0.116	-0.915	-0.456	-0.582	1.000	
MN	-0.040	0.430	-0.875	-0.298	-0.571	-0.456	-0.238	0.667	1.000

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
PREMIERE PARTIE : DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES.	
CHAPITRE I : Importance de l'élément phosphore.	4
I.1 - Rôle du phosphore dans l'activité physiologique.	4
I.2 - Dynamique du phosphore dans le sol.	6
I.2.1 - Le phosphore soluble.	6
I.2.2 - Le phosphore échangeable.	7
I.2.3 - Le phosphore peu ou pas soluble.	7
I.2.4 - Le phosphore organique.	8
I.3 - Cinétique de réactions de solubilisation, d'absorption et de désorption.	8
I.4 - Symptômes de carence et de toxicité en phosphore.	14
I.5 - Apports d'engrais phosphatés.	15
I.6 - Relations du phosphore et autres éléments.	17
CHAPITRE II : Utilisation du phosphore dans la fertilisation.	18
II.1 - Origine du phosphore.	18
II.1.1 - Origine ignée.	18
II.1.2 - Origine sédimentaire.	18
II.1.3 - Origines diverses.	19
II.2 - Réserves mondiales en phosphates naturels et consommation d'engrais phosphatés.	19
II.3 - Valorisation des phosphates naturels.	22
II.3.1 - Les phosphates naturels en Algérie.	27
II.3.2 - Traitements subis par les phosphates naturels.	28

II.4 - Les rejets de phosphate comme autre source d'engrais phosphatés.	31
II.4.1 - Les rejets de criblage primaire.	31
II.4.2 - Les rejets de débourage	31
II.4.3 - Les rejets de dépoussiérage.	31
CHAPITRE III : Facteurs intervenant sur l'assimilabilité des phosphates naturels.	33
III.1 - Caractéristiques intrinsèques et origine.	33
III.2 - Finesse de la mouture.	34
III.3 - Facteur sol.	35
III.4 - Facteurs climatiques.	38
III.5 - Facteur végétation.	38
CHAPITRE IV : Origine et utilisations potentielles du phosphogypse.	40
IV.1 - Origine.	40
IV.2 - Utilisations en agriculture.	41
IV.3 - Autres utilisations.	43
Conclusion.	44
DEUXIEME PARTIE : MATERIEL ET METHODES	
CHAPITRE V: Matériel. d'étude.	46
V.1- Formes de phosphates utilisés.	46
V.1.1- Le phosphogypse.	46
V.1.2- Les rejets de phosphate.	46
V.1.3- Le phosphate naturel.	46
V.2- Sols utilisés.	48
V.2.1- Sol C.	48
V.2.2- Sol S.	49

V.2.3- Granulométrie des deux sols étudiés.	49
V.2.4- Caractéristiques chimiques des sols C et S.	50
V.3- Matériel végétal.	51
CHAPITRE VI : Méthodologie d'étude.	52
VI.1 - Dispositif expérimental :	
méthode STANDFORT-DE-MENT.	52
VI.1.1- Principe de la méthode STANDFORT-DE-MENT.	52
VI.1.2. Mode opératoire.	52
VI.2 - Analyses effectuées.	54
VI.2.1- Sur les mélanges phosphate naturel/ phosphogypse et refus dépolisés/ phosphogypse.	54
VI.2.2- Sur les sols C et S.	55
VI.2.3- Sur les deux cultures utilisées.	57
VI.3 - Calcul de la fumure phosphatée.	57
VI.3.1 - Conversions.	57
VI.3.2 - Calcul des doses de fumures apportées.	58
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET INTERPRETATION.	
CHAPITRE VII : Effet des mélanges phosphates naturels- Phosphogypse (PN/PG) sur la solubilité et la disponibilité du phosphore.	62
VII.1 - Effet des mélanges P.N/P.G sur le pH.	62
VII.2 - Effet des mélanges sur la solubilité du phosphore dans différents solvants.	66
VII.2.1 - Solubilité dans l'eau.	66
VII.2.2 - Solubilité dans l'acide citrique à 2%.	69
VII.2.3 - Solubilité dans le citrate d'ammonium neutre.	72

VII.3 - Comparaison de la solubilité des mélanges PN/PG.	76
VII.4 - Effet des mélanges sur la quantité de phosphore assimilable.	79
CHAPITRE VIII : Effet des mélanges refus dépoussiérés- phosphogypse (RD/PG) sur la solubilité et la disponibilité du phosphore.	83
VIII.1-Effet des mélanges sur le pH.	83
VIII.2 - Effet des mélanges sur la solubilité du phosphore différents solvants.	86
VIII.2.1 - Solubilité dans l'eau.	86
VIII.2.2 - Solubilité dans l'acide citrique à 2%.	89
VIII.2.3 - Solubilité dans le citrate d'ammonium neutre.	92
VIII.3 - Comparaison de la solubilité des mélanges RD/PG.	95
VIII.4 - Effet des mélanges sur la quantité de phosphore assimilable.	97
Comparaison des mélanges PN/PG et RD/PG.	100
CHAPITRE IX : Relation sol-plante-type de fertilisants.	102
IX.1 - Rôle de la nature du végétal.	102
IX.1.2 -Sol calcaire.	102
IX.1.2 - Sol non calcaire.	105
IX.2 - Rôle de la nature du sol.	105
IX.2.1 - Orge.	105
IX.2.2 - Vesce.	107

IX.3 - Synthèse et discussion des résultats.	107
IX.4 - Efficacité agronomique relative.	111
IX.4.1 - Rôle de la nature du sol.	111
4.1.1 - Sol calcaire.	111
4.1.2 - Sol non calcaire.	113
IX.4.2 - Rôle de la nature du végétal.	113
4.2.1 - Orge.	113
4.2.2 - Vesce.	113
CHAPITRE X : Influence de la nature du fertilisant phosphaté sur la nutrition des cultures en éléments autre que le phosphore.	
X.1 - L'AZOTE.	118
X.1.1 - Rôle de la nature du sol.	118
1.1.1 - Sol calcaire.	118
1.1.2 - Sol non calcaire.	118
X.1.2 - Rôle de la nature du végétal.	121
1.2.1 - Orge.	121
1.2.2 - Vesce.	121
X.2 - LE POTASSIUM.	122
X.2.1 - Rôle de la nature du végétal.	122
2.1.1 - Sol calcaire.	122
2.1.2 - Sol non calcaire.	122
X.2.2 - Rôle de la nature du sol.	124
2.2.1 - Orge.	124
2.2.2 - Vesce.	124
X.3 - LE CALCIUM.	128
X.3.1 - Rôle de la nature du végétal.	128
3.1.1 - Sol calcaire.	128
3.1.2 - Sol non calcaire.	128

X.3.2 - Rôle de la nature du sol.	131
3.2.1 - Orge.	131
3.2.2 - Vesce.	131
X.4 - LE MAGNESIUM.	134
X.4.1 - Rôle de la nature du végétal.	134
4.1.1 - Sol calcaire.	134
4.1.2 - Sol non calcaire.	134
X.4.2 - Rôle de la nature du sol.	134
4.2.1 - Orge.	134
4.2.2 - Vesce.	136
X.5 - LE SODIUM.	139
X.5.1 - Rôle de la nature du végétal.	139
5.1.1 - Sol calcaire.	139
5.1.2 - Sol non calcaire.	139
X.5.2 - Rôle de la nature du sol.	141
5.2.1 - Orge.	141
5.2.2 - Vesce.	141
X.6 - LE CUIVRE.	146
X.6.1 - Rôle de la nature du végétal.	146
6.1.1 - Sol calcaire.	146
6.1.2 - Sol non calcaire.	146
X.6.2. - Rôle de la nature du sol.	147
6.2.1 - Orge.	147
6.2.2 - Vesce.	147
X.7 - LE ZINC.	150
X.7.1 - Rôle de la nature du végétal.	150
7.1.1 -Sol calcaire.	150
7.1.2 - Sol non calcaire.	150
X.7.2 - Rôle de la nature du sol.	152
7.2.1 - Orge.	152
7.2.2 - Vesce.	152

X.8 - LE MANGANESE.	154
X.8.1 - Rôle de la nature du végétal.	154
8.1.1 - Sol calcaire.	154
8.1.2 - Sol non calcaire.	155
X.8.2 - Rôle de la nature du sol.	155
8.2.1 - Orge.	155
8.2.2 - Vesce.	157

X.9 - SYNTHÈSE ET DISCUSSION DES RESULTATS.	159
---	-----

CONCLUSION GENERALE.	163
----------------------	-----

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

ANNEXES.