

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université ELHADJ LAKHDAR de BATNA

Faculté des sciences
Département d'agronomie

MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme
de magister en agronomie

Option : agrotechnie

Présenté par :

RAZI SABAH

***Etude expérimentale de l'influence du
gypse sur la dynamique du phosphore
dans le sol et sa cinétique d'absorption
par le ray-grass***

Soutenu le 29-05-2006 devant la commission d'examen

Prof. BOUZERZOUR H. UNIVERSITE DE SETIF.....Président

Prof. HALITIM A. UNIVERSITE DE BATNA.....Rapporteur

Mc. BENSALD R., UNIVERSITE DE BATNA.....Examineur

D^f. HALILAT M.T., UNIVERSITE DE OUERGLA.....Examineur

2005-2006

Remerciements

Au moment de mettre un point final à ce travail, je tiens à exprimer mes remerciements à tout ceux qui ont contribué à sa réalisation.

Mes remerciements vont d'abord à **Mr HALITIM A.**, pour avoir accepté de diriger ce travail tout au long de sa réalisation, pour ces interventions précieuses et les conseils qu'il a bien voulu consacrer à ce mémoire.

J'exprime ma reconnaissance aux membres du jury qui ont accepté de juger ce travail. La tâche est sans doute ardue :

Je porte toute ma gratitude à **Mr. BOUZERZOUR H.**, professeur à l'université de Sétif, pour avoir accepté de présider le jury.

J'exprimer ma reconnaissance à **Mr. HALILAT M.T.**, maître de conférence à l'université de Ouergla, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je me dois tout autant de remercier **Mr. BANSAID R.**, aussi pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je tiens remercier tout particulièrement mon enseignant **Mr BENSID Z.**, chargé de cours au département d'agronomie de Batna, car il m'a toujours encouragé, je le salue également pour ses précieux conseils, remarques et corrections qui ont permis l'élaboration de ce manuscrit.

Je tiens aussi à remercier le personnel des laboratoires d'agronomie de Batna (Mr HADJI N. Mr ABOUBOU A, Mr AMOURI,...) pour leurs aides.

Doivent être également remerciés, avec une même intensité, toutes personnes ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

A UNE ALGERIE MEILLEURE

Sommaire

Introduction	1
--------------------	---

Première partie

Etat des connaissances sur le phosphore dans le sol et dans la plante et sur les sols gypseux

Chapitre I le phosphore dans le sol et dans la plante

1. Le phosphore dans le sol	3
1.1 Généralités sur le phosphore dans le sol.....	3
1.2 Etat du phosphore dans le sol.....	4
1.2.1 Le phosphore libre ou forme ionique.....	4
1.2.2 Le phosphore minéral.....	4
1.2.2.1 Le phosphore dans les combinaisons minérales.....	4
1.2.2.2 Le phosphore adsorbés sur les constituants du sol.....	6
1.2.2.3 Mécanismes d'adsorption du phosphore.....	7
1.2.2.4 Les surfaces réactives vis-à-vis du Le phosphore.....	8
1.2.3 Le phosphore organique.....	9
1.3. Dynamique du phosphore dans le sol.....	10
1.3.1 Etat d'équilibre.....	10
1.3.2 Transferts du phosphore dans le sol.....	10
1.3.3 Mouvement du phosphore entre la phase solide et a solution du sol.....	11
1.3.4 Mouvement d'ions entre combinaisons phosphatées et solution du sol.....	12
1.3.5 Le pouvoir fixateur.....	13
1.4 Représentation fonctionnelle du phosphore dans le système sol-plante	14
1.4.1 Notions du phosphore assimilable et de bio-disponibilité du phosphore.....	16
1.4.2 Caractérisation de la fraction bio-disponible du phosphore.....	18
1.5. Appréciation de la bio-disponibilité du phosphore dans le sol.....	19
Analyse de routine.....	19
Evaluation du pouvoir fixateur.....	19
Méthode isotopique.....	20
Méthode biologique.....	20
1.6 Action des différents facteurs sur la bio-disponibilité du phosphore.....	21
1.6.1 Action des facteurs physiques.....	21
1.6.2 Action des facteurs chimiques du sol.....	22
1.6.3 Action des facteurs biologiques.....	24
1.6.4 Action du pouvoir fixateur.....	24
1.7 Interaction des autres éléments avec le phosphore.....	24
1.8. Mode d'action des engrais phosphatés.....	25
2 Le phosphore dans la plante	26
2.1 Importance et rôle du phosphore dans la plante.....	26
2.2 Absorption du phosphore par la plante.....	26
2.3 Rôle des micro-organismes dans l'absorption du phosphore.....	28
2.3.1 Définition des mycorhizes.....	28
2.3.2 Les mycorhizes et la nutrition phosphatée des plantes.....	29

2.4 Nutrition phosphatée des plantes en absence et en présence d'apport récent d'engrais phosphatée	29
2.4.1 Nutrition phosphatée des plantes en absence d'apport récent d'engrais phosphatée.....	29
2.4.2 Nutrition phosphatée des plantes en présence d'engrais phosphatée récemment appliqué.....	29
2.5 Exigences nutritionnelles des plantes en phosphore.....	30
2.6 Teneurs des plantes en phosphore.....	32
2.7 L'offre du sol et la demande de la plante, rôle dans la nutrition phosphatée des plantes.....	33
Effet de la fertilisation phosphatée sur la teneur en phosphore des cultures fourragères.....	35
Conclusion.....	36

Chapitre II Les sols gypseux

1. Généralités sur les sols gypseux.....	37
2. Origine.....	37
3. Formes d'accumulation gypseuse.....	38
4. Classification des sols gypseux.....	38
4.1 Classification Française.....	38
4.2 Classification Américaine.....	39
4.3 Classification FAO.....	39
5. Répartition géographique des sols gypseux.....	39
5.1 Dans le monde.....	39
5.2 En Algérie.....	41
6. Caractéristiques des sols gypseux.....	42
<u>6.1 Propriétés physique et chimiques des sols gypseux.....</u>	42
6.1.1 Propriétés physiques.....	42
6.1.1.1 Texture.....	42
6.1.1.2 Structure.....	42
6.1.1.3 Densité des sols gypseux.....	44
6.1.1.4 Relation sol/eau dans les sols gypseux	44
6.1.3 Propriétés chimiques.....	45
6.1.3.1 Solubilité du gypse.....	45
6.1.3.2 La capacité d'échange cationique.....	49
6.1.3.4 Composition du complexe absorbant et de la solution du sol.....	50
6.1.4 Propriétés thermiques.....	50
7 Problèmes d'analyse des sols gypseux	50
8. Relation entre la présence du gypse et la production agricole.....	51
8.1 Le gypse entant qu'amendement.....	51
8.2 Le gypse, une contrainte agricole.....	51
8.2.2 Effet des propriétés physiques du gypse sur la production agricole.....	52
8.2.3 Effets des propriétés chimiques du gypse sur la production agricole.....	53
8.2.4 Impact biologique de la présence du gypse	54
<u>9 Le phosphore dans les sols gypseux</u>	54
<u>9.1 Fertilité des sols gypseux.....</u>	54
9.1 Effet de gypse sur l'azote et la matière organique	55
9.3 Effet de gypse sur le potassium et les microéléments	55
9.4 Fertilité phosphatée des sols gypseux	56

9.5 Méthode d'étude du statut phosphaté utilisé déjà.....	56
9.6 Immobilisation du phosphore dans les sols gypseux	57
9.7 Effet de la quantité de gypse sur l'immobilisation du phosphore.....	58
9.8 Biodisponibilité du phosphore dans les sols gypseux.....	59
Conclusion	60

Deuxième partie

Etude expérimentale

Chapitre I Matériel et méthodes	61
1. Objectif de l'étude	61
2. Principe	61
2.1 Méthode de détermination du pouvoir fixateur et de la dynamique du phosphore.....	61
2.1.1 détermination du pouvoir fixateur.....	62
2.1.2 Etude de la dynamique du phosphore	62
2.2 Appréciation de la disponibilité du phosphore par la culture du ray-grass	63
3. Matériel utilisé	65
3.1 Préparation des mélanges sol-gypse	66
3.2 Apport d'engrais phosphatés	67
3.3 Dispositif expérimental	68
3.4 Conduite de l'essai	68
3.4.1 Préparation des pots	68
3.4.2 Semis	68
3.4.3 Irrigation	70
3.4.4 Fertilisation.....	70
3.5 Conditions de l'essai	70
3.6 Durée de l'essai	70
3.7 Prélèvement des échantillons de sol et coupes végétales	70
4 Mesure à effectuer.....	70
5. Méthode d'analyse.....	72
5.1 Détermination du pouvoir fixateur	72
a Méthode d'extraction à CaCl_2	72
b Méthode de BLAKEMORE	72
5.2 Dynamique du phosphore	74
5.2.1 Analyse du phosphore assimilable Joret-Hebert	74
5.2.2 Analyse du phosphore assimilable Olsen	74
5.3 Détermination du phosphore total contenu dans la plante.....	74
5.4 Autres analyse effectuées	74
6. Méthode statistique	75

Chapitre II Résultats et discussion

1 Influence du gypse sur le dynamique du phosphore dans le sol.....	76
1.1 Influence du gypse sur le pouvoir fixateur en phosphore du sol.....	76
a. Méthode d'extraction au CaCl_2	76
b. Méthode BLAKEMORE.....	76

1.2 Influence du gypse sur la dynamique du phosphore.....	79
1.2.1 Evolution du phosphore assimilable joret-Hebert et du phosphore assimilable Olsen.....	79
1.2.1.1 Evolution de phosphore assimilable sans apport d'engrais.....	79
1.2.1.2 Evolution du phosphore assimilable avec apport d'engrais.....	85
1.2.1.2.1 Evolution du phosphore assimilable avec apport de D1	85
1.2.1.2.2 Evolution du phosphore assimilable avec apport de D2	86
1.2.1.2 Evolution des teneurs en phosphore assimilable par rapport aux teneurs initiales.....	95
1.2.3 Influence du gypse sur les triples superphosphates apportés.....	100
Conclusion	102
2 Appréciation de l'assimilabilité du phosphore par la culture du ray-grass d'Italie	103
2.1 Influence du gypse sur la croissance et les teneurs en phosphore de la plante.....	103
2.1.1Présentation des résultats.....	103
2.1 Influence du gypse sur la croissance et les teneurs en phosphore de la plante.....	103
2.1.1.1 Influence du gypse sans apport d'engrais	103
2.1.1.2 Influence du gypse après apport d'engrais	104
a. influence du gypse avec apport de D1.....	104
b. influence du gypse après apport de D2.....	104
2.1.1.2 Influence du gypse sur les taux d'accroissement	109
2.1.1.3 Influence du gypse sur la cinétique de croissance du ray-grass.....	110
2.1.1.4 Influence du gypse sur les quantités de matière sèche totale produite.....	115
2.1.1.5 Gain de croissance.....	120
2.1.2Discussion	121
2.2 Influence du gypse sur les quantités du phosphore absorbé et sa cinétique d'absorption par la plante.....	124
2.2.1Présentation des résultats	124
2.2.1.1 Influence du gypse sur les quantités du phosphore absorbé.....	124
2.2.1.1.1 Influence du gypse sans apport d'engrais	124
2.2.1.1.2 Influence du gypse avec apport d'engrais sur les quantités du phosphore absorbé.....	125
2.2.1.2 Influence du gypse sur le taux de prélèvement du phosphore par la plante.....	129
2.2.1.3 Influence du gypse sur la cinétique d'absorption du phosphore	129
2.2.1.4 Influence du gypse sur l'absorption totale du phosphore par le ray-grass.....	133
2.2.2 Discussion.....	137
2.3 Influence du gypse sur la partie racinaire.....	138
3 Relation entre la réponse à de la plante et le flux du phosphore dans le sol.	143
4 Etude comparative des deux méthodes d'extraction du phosphore assimilable.	145
Conclusion.....	145
Conclusion générale.....	148
Références bibliographiques.....	151

Introduction

Introduction

La population mondiale est actuellement de 6 milliards d'habitant, devrait atteindre 8 milliards d'ici 2020 et 9.5 milliards d'ici 2050, d'ici la population des pays en voie de développement sera probablement de 8.2 milliards (Lal, 2002), approximativement 50% des terres potentiellement cultivables sont actuellement en cultures annuelles ou permanentes, de plus 2 milliards d'hectares ont été dégradés en raison de nombreux processus. Cependant, la satisfaction des besoins accroissant des populations en alimentation reste toujours le but de l'agriculture, ce ci impose de résoudre les problèmes qui touchent la production agricole, d'aménager et de préserver les ressources naturelles dont est le sol. Ce dernier, support naturel et source de nutrition des cultures, est menacé par la dégradation de ces qualités physico-chimiques, par l'érosion, la pollution, la désertification et la salinisation, ce ci par action des facteurs naturels et anthropiques. La salinisation des terres est un problème majeur touchant les sol des régions arides et semi-arides, cas de notre pays l'Algérie. En effet, la salinisation est l'accumulation des sels (calcaire, gypse, chlorure de sodium, etc...) dans le sol à des teneurs supérieures aux seuil de tolérance des cultures, ce qui conduit à la réduction des rendements, à des terres incultes ou à l'installation d'un paysage spécifique (espèces végétales tolérantes les fortes teneurs en sels). Parmi ces sels on note le gypse. Ce dernier utilisé comme amendement pour les sols très argileux, sols salés et sols acides, conduit à l'amélioration des qualités physico-chimiques de ces sols, c'est un amendement calcique et source de soufre, favorise l'infiltration dans les sols très argileux, la floculation dans les sols sodiques et diminue la toxicité par l'aluminium dans les sols acides, joue un rôle contraire à de forte teneurs. En effet, un sol est dit gypseux lorsqu'il présente une teneur en gypse supérieure à 5% (FAO, 1998), ces sols occupent 18% de la surface de la terre et 12.2% de la surface de l'Algérie. Ils présentent plusieurs contraintes à la production agricoles liées à leurs propriétés physico-chimiques et à leurs fertilités, ils sont généralement pauvres en éléments nutritifs, surtout en phosphore. Cet élément nécessaire à la croissance des plantes et jouant un rôle important dans le métabolisme peut conduire par ces carences à une diminution importante des rendements agricoles. Les teneurs des sols gypseux en phosphore total sont faibles, ainsi que les teneurs en phosphore assimilable, et dépendent du taux de gypse présent

Il devient très important d'étudier le statut phosphorique des sol gypseux et l'effet des différentes teneurs en gypse sur la dynamique du cet élément et de sa biodisponibilité

pour les cultures, ainsi que la détermination du seuil de gypse à partir duquel cet élément devient un facteur limitant de la production. Peu d'études sont réalisées dans ce contexte.

La détermination des teneurs en phosphore assimilable est réalisée souvent par analyses chimiques, extraction par les produits chimiques et dosage. Plusieurs méthodes sont adoptées selon la nature du sol, il importe donc de choisir la méthode la plus convenable à l'extraction de cet élément dans les sols gypseux.

Le présent travail, réalisé au laboratoire, porte sur les objectifs suivants :

- l'étude de l'influence des teneurs croissantes de gypse (0, 20,40 et 60%) et un sol à 5% de gypse, sur la dynamique du phosphore.

- l'étude de la biodisponibilité de cet élément pour la culture du ray-grass d'Italie, par la réalisation de 3 coupes successives et la détermination de la matière sèche produite et de quantité de P absorbées, à différentes teneurs en gypse.

La dynamique du phosphore est étudiée par la détermination des quantités de phosphore assimilable après analyse chimique. Comme pour les sols calcaires les deux méthodes Joret-Hebert et Olsen sont utilisées, et comme un autre objectif la meilleure méthode d'extraction du phosphore assimilable est déterminée en confrontant les résultats de l'analyse chimique à ceux du test biologique.

Première partie

Etat des connaissances actuelles sur
le phosphore dans le sol et dans la plante
et
sur les sols gypseux

Chapitre I

Le phosphore dans le sol et dans la plante

CHAPITRE I

Le phosphore dans le sol et dans la plante

1. Le phosphore dans le sol

1.1 Généralités sur le phosphore dans le sol

La découverte du phosphore remonte à 1669, par l'alchimiste hambourgeois Hennig Brandt (1669). C'est probablement le seul élément isolé initialement dans de la matière organique animale, puis végétale (Greenwood et Earnshaw, 1984). Il n'a été identifié dans l'apatite qu'en 1779 par Torben Bergman (1735-1784) et Joseph Louis Proust (1754-1826).

Le phosphore provient de l'altération des roches (Larsen, 1967), il est présent en quantités variables dans les minéraux silicatés, et surtout il entre dans la composition de près de 200 minéraux phosphatés, le principal minéral des sols est l'apatite (Frossard et al, 1995).

C'est élément du groupe 15(V_a) dans le tableau périodique des éléments (figure I-1), il possède par conséquent la couche de valence $3S^2-3P^3$, il est trivalent à l'état fondamentale.

6	7	8
C 12,0107	N 14,00674	O 15,9994
14	15	16
Si 28,0855	P 30,973761	S 32,064
32	33	34
Ge 72,61	As 74,92160	Se 78,96

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

Le phosphore est le 11^{ème} élément par ordre d'abondance dans les roches crustales, la concentration moyenne y est évaluée à 1120ppm. Ces concentrations dépendent de ses origines géologiques et des minéraux constructifs du sol (apatite, phosphates tricalciques amorphes ou cristallisés, phosphates de fer, d'aluminium et de magnésium) (Diehl, 1975).

En effet, ces teneurs sont de l'ordre de 0,3 à 1% dans les sols dérivés de roches cristallines ou volcaniques, ces dernières correspondent pour une couche arable de 3000 tonnes à une masse de l'ordre de 1 à 10 tonnes (Morel, 1996). Dans les cas extrêmes, la concentration en phosphore dans les sols s'échelonne de 100 à 3000kg/ha (Beunneau et Souchier, 1994). Le phosphore se trouve surtout sous forme d'orthophosphate (acide phosphorique) (Morel, 1996)

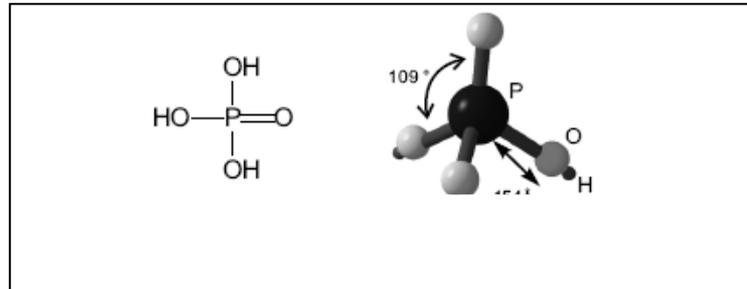


Figure II-2 :L'acide orthophosphorique (Vanden Bossche, 1999)

1.2 Etat du phosphore dans le sol

Le phosphore total du sol est la quantité total de cet élément présente dans le sol, elle comprend une fraction minérale et une fraction organique à des pourcentages de 5 à 95% du phosphore total, une faible quantité est présente dans la solution du sol (0.002 à 2mg/l) (Tarafdar et Claassen, 2004). La fraction minérale présente 50 à 70% du phosphore total (Pierzynsky et al, 2000), le phosphore organique représente 25%.

Le phosphore se trouve dans le sol sous trois états :

- Etat libre
- Etat de combinaison minérale
- Etat de combinaison organique

1.2.1 Phosphore libre ou forme ionique

C'est le phosphore dissout dans la solution du sol, forme ionisée de l'acide phosphorique H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-} dont les proportions relatives dépendent du pH du milieu concerné. Ces formes sont à l'origine de la nutrition phosphatée des cultures (Morel, 1996).

1.2.2 Le phosphore minéral

1.2.2.1. Le phosphore dans les combinaisons minérales

Ces composés sont représentés généralement par les phosphates calciques et les phosphates de fer et d'aluminium.

Pour les phosphates calciques on note:

L'apatite de formule générale $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{Y}_2$, Y désigne les ions tels que F^- , OH^- , Br^- , Cl^- . La fluoroapatite est la forme la mieux représentée dans les roches ignées et métamorphiques. Occasionnellement, Na et Mg peuvent se substituer à Ca. De même la substitution de certains groupements phosphates par des carbonates CO_3^{2-} conduit à de nombreuses apatites carbonatées. Dans un environnement calcaire, l'apatite est un minéral très stable et se présente souvent dans la taille des sables, ce qui la rend aisément reconnaissable (Frossard et al. 1995). En effet, c'est un minéral facile à synthétiser à basse température, en milieu alcalin. L'apatite est fréquemment présente sous forme d'inclusions minérales (Norrish et Rosser, 1983), elle est transparente (figure I-3)



Figure I-3 : L'apatite (Vanden Bossche, 1999)

Aussi on note pour les phosphates calciques : phosphates calciques dicalcique hydraté $\text{CaH}(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et monocalcique hydratée $\text{CaH}_2(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

Les phosphates calciques sont autant moins solubles que leur richesse en calcium est plus grande (Morel, 1996). Par ordre de solubilité décroissante, ils se classent comme suit :

$\text{CaH}_2\text{PO}_4^-$	phosphate monocalcique
Ca_2HPO_4	phosphate dicalcique
$\text{Ca}_3\text{PO}_4^{2-}$	phosphate tricalcique
$\text{Ca}_3\text{PO}_4^{2-}$	phosphate tricalcique
$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{CaO}$	oxyapatite
$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{CaOH}_2$	hydroxyapatite
$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{CaCO}_3$	carbonate apatite
$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{CaF}^{2-}$	fluorapatite

Pour les phosphates de fer et d'aluminium, il faut noter qu'on les rencontre dans les sols acides. Dans les sols bien drainés, ils sont représentés par les strengites $\text{Fe}(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, la variscite $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, dans les sols hydromorphes, la formation de la vivianite $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ est mise en place (Morel, 1996).

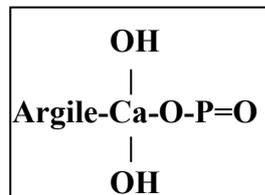
1.2.2.2 Le phosphore adsorbé sur les constituants du sol

Les ions phosphates ont une charge électronégative, ils sont retenus dans le sol. L'étude par microsonde montre que le phosphore est plus généralement dispersé dans la matrice. Il se trouve alors adsorbé à la surface des particules constitutives du sol :

Sur les surfaces d'hydroxydes de fer et d'aluminium (goethite et gibbsite,...), sur les surfaces argileuses directement au niveau des sites électropositifs présents sur les surfaces brisées des feuillets ou indirectement par intermédiaire de cation polyvalents exemple : Ca^{2+} , Fe^{3+} et Al^{3+} , sur la calcite: l'anion phosphorique se transforme progressivement en phosphate calcique, et sur les complexes organométalliques: l'ion métallique du complexe étant susceptible de retenir l'ion phosphorique (Morel, 1996).

Les phénomènes d'adsorption et de désorption présentent des cinétiques rapides par rapport aux réactions de précipitation ou de dissolution. Pour cette raison, ils contrôlent les concentrations de phosphore dans la solution du sol et par conséquent, sa mobilité et sa bio-disponibilité.

Les capacités et les énergies de rétention des adsorbants sont très différentes (Vilain, 1997). Dans les pays à climat tempéré la rétention est essentiellement le fait des argiles calciques et d'hydroxydes de fer et d'aluminium, la masse d'ions adsorbés peut atteindre 800 à 1000kg/ha d'une couche arable, les ions sont très inégalement déplaçables (Vilain, 1997).



L'adsorption par définition est *l'accumulation nette de matériel sur une interface entre deux phases contiguës* (Sposito, 1984 in Molle, 2003), c'est un phénomène de surface. Il s'agit généralement de l'interface entre une phase solide et une phase liquide. La molécule qui s'accumule ainsi selon arrangement bidimensionnel est « *l'adsorbat* ». La surface solide sur laquelle elle s'adsorbe est « *l'adsorbant* ». (Sposito 1989)

Certains auteurs emploient le terme de sorption pour évoquer le phénomène, ce terme a une signification plus large car il couvre les réactions rapides d'adsorption et de désorption ainsi que les phénomènes plus lents. (Frossard et al, 1995).

1.2.2.3 Mécanismes d'adsorption du phosphore

Trois mécanismes d'adsorption peuvent être distingués. Si aucune molécule d'eau ne s'interpose entre l'ion adsorbé et l'adsorbant, on parle de complexe de sphère interne. C'est le cas de la complexation d'ion K^+ par les cavités siloxanes des surfaces basales de vermiculite (Sposito, 1989). Ce type de liaison peut être de type ionique ou covalent. Elle peut intervenir même si l'ion est la charge sont de même signe (Molle, 2003). Lorsqu'une molécule d'eau, au moins, s'interpose entre la surface et l'ion, la liaison est qualifiée de complexe de sphère externe, les liaisons entre la substance adsorbée et l'adsorbant sont essentiellement électrostatiques (Molle, 2003). Enfin, si un ion solvaté ne forme pas de complexe avec un site chargé de la surface mais contribue simplement à neutraliser la charge de surface par sa présence, il est adsorbé dans la couche diffuse.

L'adsorption spécifique (complexation de sphère interne) suppose par conséquent des groupements réactifs à la surface de l'adsorbant. L'adsorption non spécifique (complexation de sphère externe ou liaison dans la couche diffuse) nécessite des surfaces chargées (figure I-4).

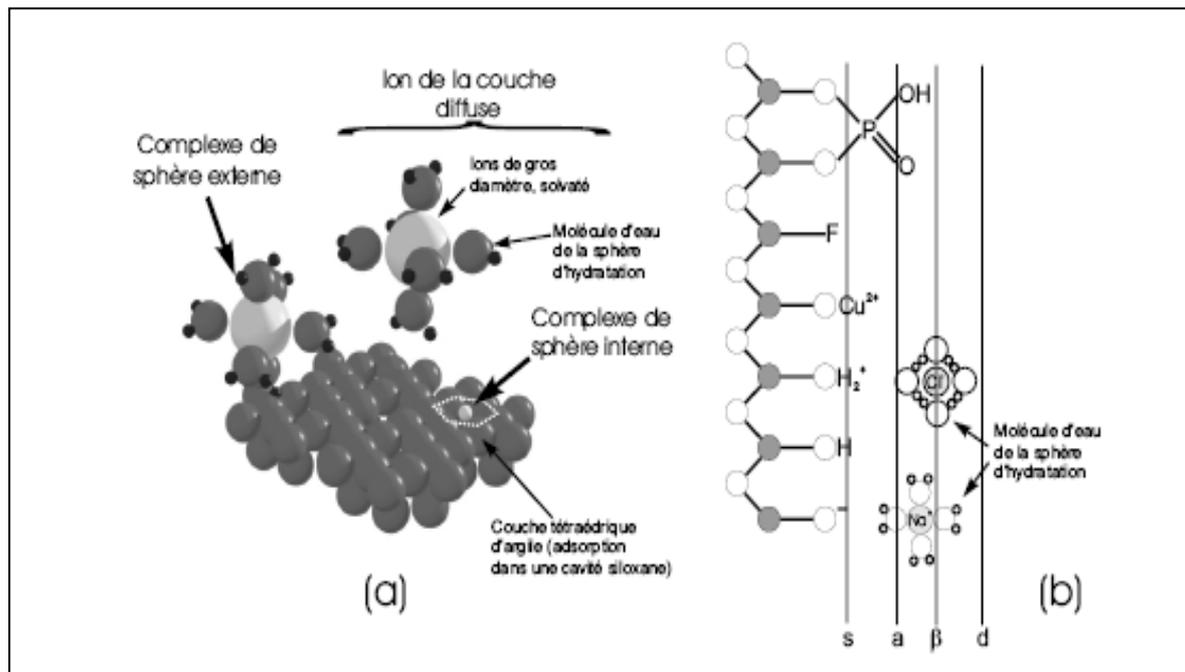


Figure I-4 : (a) Les trois types de complexes de surface, d'après Sposito (1989). (b) Schéma d'une surface d'oxyde et hydroxyde et des différents plans associés : s=hydroxyles de surface, a=complexe de sphère interne, β=complexe de sphère externe, d=couche des ions diffus (assimilé à un plan), d'après Stumm et Morgan (1996).

1.2.2.4 Les surfaces réactives vis à vis des ions phosphates :

a. Les surfaces de carbonate de calcium :

Le terme sorption est employé abusivement dans les sols calcaires. Les surfaces de carbonates de calcium favorisent plutôt la nucléation et la croissance de phosphate de calcium. Freeman et Rowell (1981) ont montré ce phénomène par l'étude d'une surface de calcite au microscope électronique à balayage et par diffraction des rayons X. Ils ont mis en évidence la nucléation de monocalcium-phosphate MCP, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ et de dicalcium-phosphate DCP, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$. Ces phases minérales se transforment en dicalcium-phosphate dihydrate DCPD, $\text{Ca}(\text{HPO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et lentement en octacalcium phosphate OCP, $\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{HPO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Finalement ces différentes espèces sont des précurseurs de l'hydroxyapatite (Lindsay et al. 1989). L'adsorption sensu stricto sur la surface de calcite s'opère réellement. Mais elle correspond à une période très courte, avant la nucléation d'un phosphate de calcium qui s'apparente à de la croissance cristalline.

Carreira et Lajtha (1997) ont étudié la fixation du phosphore dans les sols calcaires (dolomitiques) méditerranéens. Le phosphore lié au calcium y était essentiellement composé d'apatite. Cependant, une partie du phosphore labile est apparue adsorbée sur les carbonates. Castro et Torrent (1998) ont mené une étude similaire sur des vertisols et inceptisols d'Andalousie. Le phosphore y semblait contrôlé par une phase minérale du calcium, moins soluble que l'octacalcium-phosphate. Lors de l'apport d'engrais, celle-ci apparaissait après un certain temps de contact. Cette insolubilisation du phosphore semble favorisée par les plus fortes concentrations en phosphore. Enfin, dans des sols calcaires de l'ouest australien, Samadi et Gilkes (1998) ont montré que le phosphore des engrais se répartissait entre les oxydes d'aluminium (29 % du P) et de fer (13 %) et formaient du dicalcium phosphate (28 %) de l'octacalcium phosphate (26 %) ainsi que de l'hydroxyapatite (13 %).

b. Les surfaces d'oxydes et d'hydroxydes de fer et d'aluminium :

L'adsorption du phosphore sur les surfaces d'oxydes et hydroxydes de fer résultait d'une ou de deux liaisons covalentes. Les auteurs s'accordent pour décrire l'adsorption du phosphore comme un échange de ligands.

c. Les formes « *cryptocristalline* » de fer et d'aluminium

Le fer et l'aluminium sont susceptibles de former des phases cryptocristallines (organisées à petite échelle), celle-ci forme des colloïdes ce qui signifie que leur comportement est déterminé par leurs propriétés de surface. En effet, les carbonates sont

assimilées aux particules non dissoutes de taille inférieure à 0,45 ou 0,2 μm . Les phases cryptocristallines du fer et de l'aluminium peuvent aussi répondre à cette définition. Ces formes sont considérées comme les précurseurs de phases minérales bien cristallisées et sont les plus réactives à l'égard du phosphore (Yuang et Lavkulich, et al, 1991).

d. Les surfaces d'argiles

L'adsorption spécifique sur les argiles peut se faire par échange de ligand, uniquement sur les bords des feuillets d'argile. Des complexes de sphère interne se formeraient aussi sur les surfaces d'argiles à charge permanente, par l'intermédiaire de cations polyvalents (Morel, 1996). Ces modes d'adsorption semblent relativement mineurs comparativement à l'adsorption sur les oxydes et hydroxydes de fer ou d'aluminium (Mc Laughlin et al, 1981).

e. La matière organique

L'adsorption directe du phosphore sur la matière organique des sols est rare. En revanche, la matière organique forme des complexes stables avec les cations métalliques du sol : Fe, Al et dans une moindre mesure Ca. Ces complexes sont appelés organométalliques (Levesque et Schnitzer, 1969). Ces assemblages forment des colloïdes réactifs à l'égard des groupements phosphates. Le mode de liaison est la formation de complexes HA-Metal- PO_4 . La matière organique lorsqu'elle est dissoute joue aussi un rôle compétiteur vis à vis de l'adsorption des phosphates sur les oxydes et hydroxydes de fer ou d'aluminium et éventuellement sur les argiles (Hue, 1991).

1.2.3 Le phosphore organique

Les concentrations en matière organique des sols varient de quelques traces dans les régions arides à des centaines de ppm dans les sols forestiers (Sanyal et De Data, 1991). La matière organique constitue 29 à 65% de phosphore total dans les horizons de surface (Harrison, 1987). Le phosphore organique peut provenir des résidus des cultures, fumier, lisiers, résidus animal, ...etc, qui contiennent du phosphore. Une fois incorporés dans le sol, ils subissent une minéralisation rapide, source d'ions PO_4^- , c'est la « *minéralisation primaire* », une partie de ces matières organiques prend la voie détournée de l'humification, subit alors une « *minéralisation secondaire* » qui est lente mais régulière. La minéralisation du phosphore est contrôlée par le taux de carbone dans les substrats organiques qui est la source d'énergie pour les microorganismes (agents responsables de la minéralisation). Cette minéralisation est favorisée aussi si la substance organique est riche en phosphore, lorsque les rapports C/P n'excèdent pas 200 à 300.

Un pH alcalin est également favorable. La minéralisation nette annuelle est d'environ 10 à 15 unités/ha, l'importance de ce processus est limité sauf en sol riche en matière organique (Vilain, 1997).

1.3 Dynamique du phosphore dans le sol

C'est le passage des ions d'un état à l'autre sous l'influence de mécanismes physico-chimiques et biologiques.

1.3.1 Etat d'équilibre

Il existe pour les ions phosphatés un état d'équilibre minéral entre la phase solide et la phase liquide.

L'addition d'ions phosphatés au sol conduit à une teneur de la solution du sol en phosphore supérieure à celle de l'équilibre. Les ions ajoutés se déplacent de la solution du sol vers la fraction solide où ils sont fixés.

Si dans un sol la plante prélève du phosphore, la solution du sol est appauvrie en cet élément, le phosphore est libéré de la phase solide à la phase liquide (Fardeau, 1993a).

Donc le phosphore peut être adsorbé, précipité, comme il peut être désorbé ou dissout. Le phosphore organique peut être minéralisé ou réorganisé.

1.3.2 Transfert du phosphore dans le sol

Il y a deux processus de transfert du phosphore dans le sol :

- Un déplacement de la solution du sol, qui dépend notamment de l'absorption de l'eau par la plante.
- L'agitation thermodynamique des éléments nutritifs, qui conduit à un déplacement vers les zones de concentration plus faible c'est la « *diffusion* ».

D'une façon générale, les transferts forment deux groupes distincts : les premiers intéressent les seuls constituants minéraux du sol, les seconds offrant un caractère biologique, ces derniers comprennent les prélèvements du phosphore par les être vivants (racine, micro-organisme, mycorhizes) de la phase liquide (Morel, 1996).

Les transferts pour le phosphore se réalisent de façon simultanée et permanente pour assurer l'approvisionnement de la solution du sol, donc il doit y avoir des renouvellements dans la phase liquide (Morel, 1996).

1.3.3 Mouvement du phosphore entre la phase solide et la solution du sol

- **L'adsorption**

C'est le déplacement des ions phosphates (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}) de la solution du sol par réactions chimiques, l'ion phosphore est adsorbé sur l'argile, les oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium, les carbonates de calcium, les matières organiques. Les phosphates adsorbés sont lentement assimilables, ils sont libérés dans la solution du sol suite au prélèvement du phosphore par la plante.

Le terme du phosphore « *labile* » désigne la fraction du phosphore absorbé facilement par la plante et la fraction à extraire et à mesurer avec le phosphore soluble par les réactifs chimiques (Pierzynski et al, 2000).

L'utilisation du phosphore radioactif a montré que les ions adsorbés et libres s'échangent continuellement, un équilibre s'instaure à un instant donné, les ions en solution et ceux susceptibles de s'y trouver facilement sont dits « autodiffusibles » (l'ensemble constitue la fraction labile du phosphore d'un sol). (Vilain, 1997). Lorsqu'une terre est mise en présence d'une solution phosphatée susceptible de l'enrichir, la quantité de phosphore adsorbée augmente avec le temps d'agitation. Tout semble se passer comme si des ions occupaient progressivement des sites d'adsorption

- **La désorption**

La désorption est la libération du phosphore de la phase solide à la phase liquide, elle a lieu suite à la diminution de la concentration du phosphore dans le sol par prélèvement par la plante (Pierzynski et al, 2000), seulement une faible quantité des ions adsorbés peuvent être désorbés facilement ; La plupart des ions phosphatés apportés au sol sont fixés et ne font pas objet à une désorption et non pas la même mobilité, certains sont très facilement retenus et semblent même renforcée à la suite d'alternance dessiccation-humectation ou d'un chaulage, ce phénomène se réfère à « *l'adsorption hystérésis* » (figure I-5), qui reflète la transformation du phosphore en forme insoluble par le processus de précipitation (Pierzynski et al, 2000).

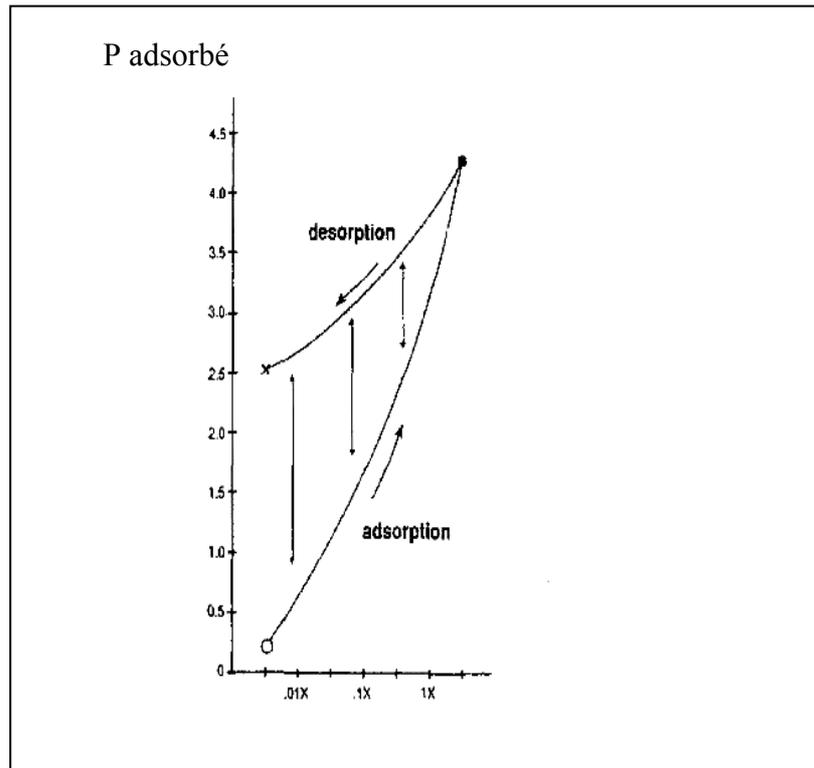


Figure I-5 : Processus d'adsorption et de désorption (Pierzynski et al, 2000)
x = concentration de la solution du sol en phosphore

1.3.4 Mouvements des ions entre combinaisons phosphatées et solution du sol

C'est la précipitation du phosphore en réagissant avec les ions positifs. La précipitation est définie comme l'accumulation d'une substance formant une nouvelle phase solide tridimensionnelle. La précipitation nécessite, en premier lieu, la formation d'un germe de nucléation stable. Ces germes peuvent se former par collisions de reactants dans la solution (nucléation homogène), ou par adsorption et formation de germes à la surface d'un solide (nucléation hétérogène) (Anderson et Rubins, 1981 in Molle, 2003).

L'équilibre solubilisation-insolubilisation est très influencé par la présence de protons et d'ions Ca^{2+} , Fe^{3+} et Al^{3+} capable de donner des composés insolubles avec les ions phosphates.

- *En milieu calcaire* : les phosphates calciques formés évoluent progressivement et deviennent de moins en moins soluble pour donner finalement les composés apatitiques quasi insoluble.

- *En milieu acide* : riche en fer et en aluminium, les phosphates de fer et d'aluminium formés sont très peu solubles, leur formation est limitée lorsque le fer et l'aluminium sont complexés par les composés organiques. En ralentissant l'évolution vers les formes insolubles, la matière organique protège les ions phosphatés.

La dissolution du phosphore précipité dépend largement du pH (Pierzynski et al, 2000). Les microorganismes modifient la solubilisation des phosphates minéraux de plusieurs manières :

- En abaissant le pH (celle acidité est engendrée par l'oxydation de substrat soufré, exemple par *Thiobacillus*)
- En synthétisant des substances organiques complexant les cations insolubles.
- En accumulant dans leur protoplasme des phosphates minéraux ou organiques sous forme plus assimilable qu'initialement, le phosphore est libéré à leur mort (Vilain, 1997).

1.3.5 Le pouvoir fixateur

L'apport au sol de quantité de phosphore supérieures à celle autorisée par la valeur limite d'équilibre, conduit à un déplacement des ions phosphatés de la phase liquide vers la phase solide où ils sont adsorbés puis intégrés dans les structures minérales. Processus qui porté le nom « *rétrogradation* » est dit maintenant « *pouvoir fixateur* » (Fardeau, 1993b).

Selon FAO (1990), les sols n'ont pas la même capacité de rétention du phosphore. L'ampleur et le taux d'immobilisation dépendent de plusieurs facteurs dont les plus importants sont :

- La concentration du phosphore dans la solution du sol ; une augmentation de la concentration en phosphore est accompagnée d'une augmentation de l'immobilisation.
- Du temps de réaction du phosphore avec le sol ; quelques réactions entre le phosphore et le sol sont rapides. Dans des sols tropicaux 95% du phosphore appliqué est immobilisé en 5mn. Dans les sols calcaires et gypseux, ces réactions se produisent lentement après une phase initiale rapide qui est suivit par un déclin lent de la solubilité du phosphore.

- La nature minéralogique du sol ; le taux et la forme des oxydes de fer et d'aluminium et le taux et le type du CaCO_3 présents influent sur la rétention en phosphore.

Le tableau I-1 montre la rétention en phosphore dans quelques ambiances pédologiques en fonction du temps et de la concentration en phosphore apporté aux sols.

Tableau I-1 : Rétention du phosphore par trois types de sol, en fonction du temps et de la concentration du phosphore apporté

		Phosphore retenu								
Type de sol	argiles %	P apporté ppm	Après 1j		Après 4j		Après 10j		Après 30j	
			ppm	%	ppm	%	ppm	%	Ppm	%
Fortement Calcaire (Barzourye)	50.8	100	84	84	88	88	89	89	93	93
		200	148	74	153	76	164	82	180	90
		400	251	63	261	65	293	73	305	76
Riche en fer et Al (Zaoutar)	46.8	100	94	94	96	96	97	97	99	99
		200	190	95	191	95	195	97	198	99
		400	349	87	364	91	378	94	386	96
Légèrement calcaire (Innasr)	42.7	100	73	73	83	83	88	88	92	92
		200	138	69	145	72	161	80	175	87
		400	168	42	236	59	281	70	296	47

1.4 Représentation fonctionnelle du phosphore dans le système sol-plante :

Il existe dans le sol deux fractions de phosphore, l'une assimilable, l'autre non, telles que les analyses de routine tendent à le suggérer. Cette approche donne une image totalement inexacte du comportement du phosphore dans le sol. Les études en phosphore marqué (^{32}P) montrent une participation de toutes les formes à des degrés divers (figure I-6).

Les phases liquide et solide sont divisées en compartiments (un compartiment ou pool est défini par Fardeau (1993a) comme la quantité d'une substance donnée dont toutes les parties constitutives, possèdent une cinétique identique de transport ou de transformation (Sheppard, 1962 ; Alkins, 1973) fixés arbitrairement à 6 dans chacun desquels le pool des

ions phosphoriques présente la même mobilité. La mobilité du phosphore décroît du compartiment 2 au compartiment 6. Ce dernier comprend des ions bien que très peu mobiles semblent cependant participer pour une faible part à la dynamique du phosphore ; en effet, il peut s'enrichir très rapidement d'une petite fraction du phosphore ajouté au sol, mais également laisser échapper des ions dits « *inassimilables* » par référence à l'action des extractifs chimiques habituels de l'extraction du phosphore du sol.

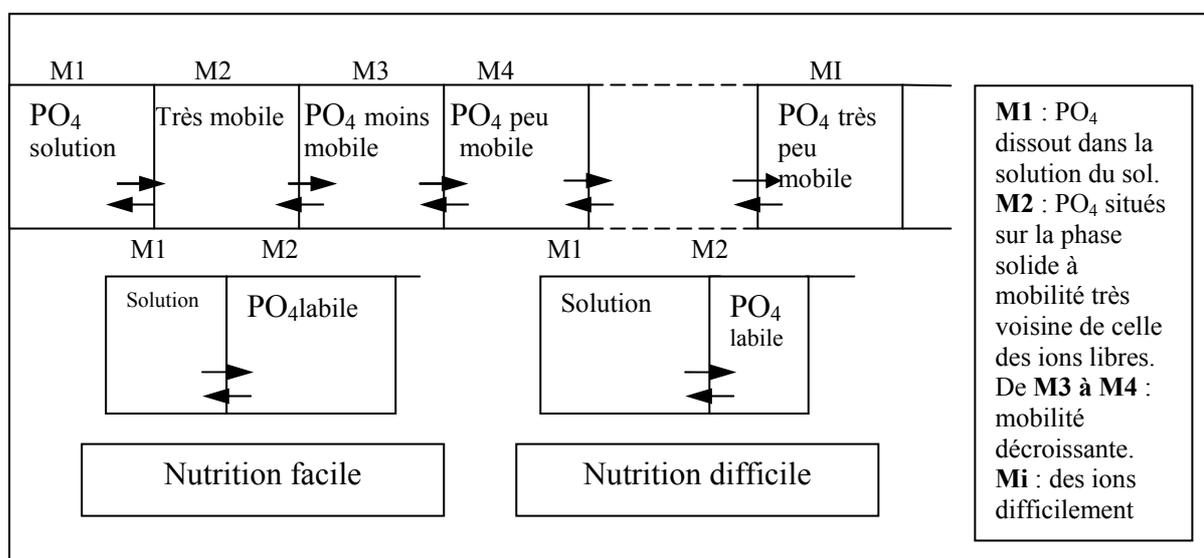


Figure I-6 : Représentation fonctionnelle du système sol-plante (Vilain, 1997)

Les ions du pool mobiles ont plusieurs origines possibles ; dissolution, minéralisation des substances organiques (libérant des orthophosphates) et apport de fertilisants phosphatés, notamment les ions présents au départ ; en effet lorsque la phase liquide s'appauvrit en ions phosphoriques (par prélèvement des plantes ou micro-organisme). L'ensemble des ions des différents compartiments participe au réapprovisionnement de la phase liquide. Les caractéristiques de ce renouvellement sont :

- La masse des ions mobiles « *autodiffusible* »
- La vitesse de diffusion des ions phosphores dans la phase solide.

Le réapprovisionnement se réalise d'abord de la phase solide « *adsorbée* » sur le complexe adsorbant (argile-humus avec pont calcique, et hydroxyde de fer et d'aluminium), ensuite à partir du phosphore lié à la matière organique et libéré par la minéralisation primaire, puis par celui libéré par la minéralisation secondaire de l'humus stable, enfin à partir du phosphore lié au minéral du sol en combinaisons plus ou moins difficile à extraire.

1.4.1 Notion du phosphore assimilable et de bio-disponibilité du phosphore

a. Notion du phosphore assimilable

Le phosphore doit être caractérisé dans le but d'établir un diagnostic du comportement des cultures, d'élaborer un pronostic sur la fertilité phosphorée d'un sol et des recommandations en matière de fertilisation. Il est rapidement apparu que certaines formes de phosphore étaient difficilement accessibles aux plantes (phosphore apatitique). La notion de phosphore assimilable a alors été définie pour désigner la fraction de phosphore susceptible d'être absorbée par les racines. Il est devenu nécessaire de corrélérer la production agricole à une quantité de phosphore dit « assimilable » extrait par un réactif chimique.

Cette notion semble être trop approximative pour être appliquée au problème de la mobilité potentielle du phosphore dans l'environnement. Notons simplement que l'idée était de simuler au mieux l'action « dissolvante » des racines. L'estimation du phosphore assimilable constitue un outil utile pour raisonner la fertilisation phosphatée.

b. Bio-disponibilité du phosphore

La notion de phosphore assimilable est insuffisante en pratique, il y est apparu nécessaire de prendre en compte les interactions entre les composantes organiques et minérales du phosphore du sol, les teneurs en solution et l'activité des racines et des microorganismes. La contribution d'un compartiment du phosphore du sol à l'alimentation de la plante, compte tenu de toutes ces interactions, en détermine la « *bio-disponibilité* »

La réserve biodisponible du phosphore est la fraction des réserves organiques et minérale susceptibles de devenir assimilable sous forme d'ions PO_4^{3-} au cours d'une année de culture.

La teneur en phosphore d'un sol ou d'un engrais s'exprime non pas en fonction de cet élément mais de son anhydride d'acide P_2O_5 qui n'a pourtant aucune vertu particulière et ne présente pas une forme de nutrition ou de transport. La plante n'absorbe en effet que les ions et c'est à l'état ionisé que la solution du sol et les colloïdes retiennent les éléments nutritifs. Pour le phosphore il sera question des ions phosphoriques PO_4^{3-} appellation générique désignant les divers ions issus de l'acide orthophosphorique (Duthil, 1973). En effet, ce dernier possède 3 acides qui se dissocient à des différents pH. Le premier commence à l'être aux pH les plus bas et sa dissociation est complète à pH 4, pour la seconde 5 et la troisième au-dessous de 10.

Les ions PO_4H^{2-} , HPO_4^- et PO_4^{3-} correspondent alors à ce même vocal, car ils ont les mêmes rôles mais varient en proportion selon le pH. Dans les conditions normales du sol, les mono et biphosphates prédominent nettement (figure I-7).

L'acide phosphorique est un triacide. Il se dissocie selon la séquence suivante :



La figure I-8 illustre la prédominance relative de formes selon le pH, dans les conditions standard. Dans les sols non carbonates, les formes H_2PO_4^- et HPO_4^{2-} sont prédominantes.

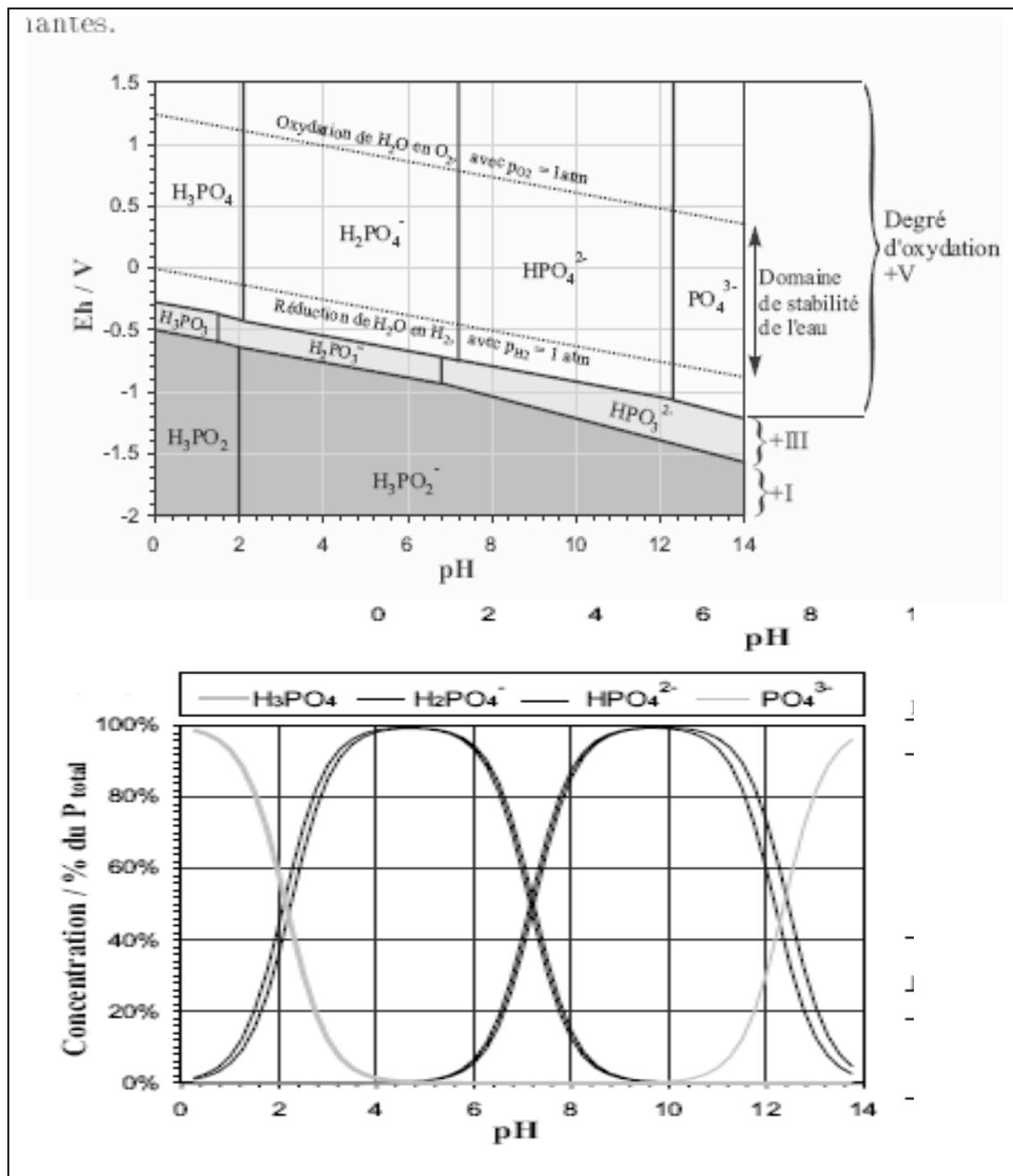


Figure I- 7: Formes du phosphore selon le pH

1.4.2 Caractérisation de la fraction biodisponible du phosphore

Seuls les fractions biodisponibles peuvent assurer la satisfaction des besoins nutritionnels des plantes, leur caractérisation nécessite la détermination de quatre paramètres susceptibles de rendre compte les facteurs : intensité, quantité et capacité reconnus de longues dates et le facteur temps, reconnu plus récemment puisque la nutrition phosphatée des plantes est un processus « *cinétique* » (Fardeau, 1993a).

- ***Le facteur intensité :***

Il quantifie le potentiel chimique des ions phosphatés dans la solution du sol, il est estimé pour la mesure de la concentration du phosphore dans la solution du sol ; c'est la vitesse de diffusion des ions phosphatés Il est mesuré habituellement par la concentration en phosphate d'eau desionisée ou d'une solution de CaCl_2 0,01M en équilibre avec le sol (Sommelier et al, 1996).

- ***Le facteur quantité :***

Il quantifie la quantité présente du potentiel chimique observé dans la solution, il est estimé en se referant à la dissolution, l'adsorption ou l'échange isotopique. Tous simplement le facteur quantité désigne la concentration des ions phosphatés dans la solution du sol.

- ***Le facteur capacité:***

Il caractérise l'aptitude du sol à s'opposer aux variations imposés soit par les prélèvements des cultures, soit par les apports de fertilisants, est à des poiles près du pouvoir fixateur ou résilience, donc le facteur capacité est l'aptitude de la phase solide à renouveler la teneur en ions phosphatés de la solution du sol (Fardeau, 1993a). Le facteur capacité est une caractéristique permanente des sols qui ne change pas suite aux pratiques agricoles. Des progrès sont indispensables pour permettre aisément sont estimation.

- ***Le facteur temps :***

L'examen par les outils isotopiques du phosphore assimilable montre que le phosphore est un système à plusieurs compartiments, chaque compartiment d'ion presque chaque ion peut caractérisé par sa « *vitesse* » effective de « *transfert* » vers la solution du sol ce qui est une vois d'intégration du facteur « *temps* ».

1.5 Appréciation de la disponibilité du phosphore dans le sol

- **Analyse de routine**

L'analyse de routine effectuée pour apprécier le phosphore disponible consiste à une solution supposée extraire la seule quantité du phosphore susceptible d'être absorbé par les racines (Morel, 1996), la quantité ainsi extraite est fréquemment dénommée « phosphore assimilable », alors qu'il ne s'agit que du phosphore extrait par un extractif chimique et non pas par un végétal (Fardeau, 1993a). Cette analyse fait appel à des solutions d'acidité ou de basicité faibles et dont l'action sur le sol relève notamment des propriétés d'échange au niveau des ions phosphoriques adsorbés (Morel, 1996). Il existe plus d'une centaine de méthodes d'extraction du phosphore, certaines méthodes sont mieux adaptées à l'estimation du phosphore phytodisponible que d'autres, les méthodes d'extraction les moins agressives à l'égard des constituants des sols, sont celles qui prouvent les données les mieux corrélées à un prélèvement des plantes (Morel, 1996). Aucune méthode d'extraction n'est universelle. Cette démarche ne procure qu'un seul paramètre expérimental, ne peut permettre de caractériser le phosphore biodisponible que par son « *facteur quantité* » (Fardeau, 1993a).

Il faut noter l'impossibilité de mettre ces concordances étroites des résultats obtenus par deux méthodes d'analyse. Pratiquement, presque toutes les méthodes font appel à des réactifs acides. Ces réactifs acides doivent être réservés de préférence aux sols acides. C'est pourquoi une distinction générale peut être faite entre les méthodes, suivant qu'elles s'appliquent aux sols acides neutres et aux sols calcaires. Le tableau II-2 présente quelques réactifs employés par les méthodes les plus courantes actuellement :

Tableau I-2 : Caractéristiques des principales méthodes d'extraction du phosphore assimilable. (Vilain, 1997)

Méthode	Date	Réactif d'extraction	Contact	Adaptation de la méthode
Dyer	1890	Acide nitrique 2% pH 2	2 . 21h	Bonne en sols acide ou neutre
Joret-hebert	1955	Oxalate d'ammonium 0.2N neutre	0.5h	Bonne en sols calcaires
Morgan barbier	1941	Acétate d'ammonium 10% Acide acétique 93%	1mn	Moyenne pour une large gamme de sol
Olsen	1954	Bicarbonate de sodium 0.5N pH 8.5	0.5h	Bonne pour une large gamme de sol
Truog	1950	Fluorure d'ammonium 0.03N , acide chyloridrique 0.025N	40 sec	Très bonne en sols acides

- **Evaluation du pouvoir fixateur**

Il est important de mesurer la capacité fixatrice « F » d'un sol, la quantité de phosphore « immobilisée » en dépens (Vilain, 1997). La valeur de la capacité fixatrice représente la quantité de phosphore soluble nécessaire pour porter jusqu'à un niveau standard la concentration d'équilibre de la phase liquide au contact avec le sol dans des conditions expérimentales définies (Morel, 1996). Le niveau de référence habituellement choisi est une concentration de 2mg/l, si F est élevée, la rétention en phosphore du sol est importante.

Deux facteurs en particulier influencent la capacité fixatrice :

- La teneur du sol en argile, plus le sol est riche en argile plus sa capacité fixatrice est élevée.
- L'apport de substance organique diminue la valeur de la capacité fixatrice, donc se révèle bénéfique dans la mobilisation du phosphore du sol.

Pour évaluer la capacité fixatrice on opère à l'aide de méthodes chimiques et de méthodes isotopiques.

- **Méthode isotopique**

Cette méthode redéfinit la notion de bio-disponibilité du phosphore. La méthode consiste à introduire dans le sol une très faible quantité d'ions phosphates « marqués », c'est à dire des phosphates dont toutes les parties des atomes de phosphore sont constitués d'atomes ^{32}P ou ^{33}P . Les ions $^{32}\text{PO}_4$ apportés en solution sont mis en contact avec le sol et subissent un échange isotopique avec les ions $^{31}\text{PO}_4$ préexistants dans les sols, échange qualifié d'autodiffusion puisque s'effectue entre ions de même espèce.

Il s'agit de mesurer la radioactivité R totale introduite et la radioactivité r de la solution après équilibre et de doser m, la quantité de phosphore en phase liquide. Si M_i est la quantité de ^{32}P introduit, M est la quantité de ^{31}P diluable dans l'échantillon est égale à $m(R/r - M_i)$. Le rapport R/r est en relation avec la capacité fixatrice.

GACHON désigne M par E le phosphore isotopiquement échangeable ou pool d'ions autodiffusibles du sol, E mesure la masse d'ions susceptibles de s'échanger avec ceux d'un engrais soluble et finalement de participer à l'alimentation des cultures.

Une variante consiste à ajouter des ions $^{32}\text{PO}_4$ à une terre sur laquelle on cultive du ray-grass d'Italie, lorsque l'équilibre isotopique est atteint, si m est la masse de P trouvée à la récolte et m_i celle des graines, avec les mêmes notations que précédemment :

$$M = R/r (m-m_i) - M_i.$$

LARSEN a désigné cette quantité par L (phosphore labile), L dépend de l'espèce végétale utilisée comme culture test.

L et E sont deux indicateurs de l'ampleur du pool susceptible de participer à l'alimentation phosphatée de la plante. C'est un peu plus proche des conditions culturelles, a intégré l'effet rhizosphère, c'est à dire de la solubilisation des phosphates au voisinage des racines (Vilain, 1997).

La méthode isotopique présente sur les méthodes chimiques l'avantage de ne pas nécessiter d'extraction, donc de ne pas perturber l'équilibre entre les formes du phosphore dans le sol. Elles ne sont pas actuellement utilisées en analyse de routine, mais servent de référence pour diriger la méthode chimique

- **Méthode biologique**

Il s'agit de pratiquer des cultures en pots dans des conditions standardisées et mesurer le phosphore absorbé, la technique la plus couramment utilisée est celle de Stendford-DE-Ment, qui réalise une culture (orge, ray-grass) carencé en phosphore. Cette méthode renseigne à la fois sur la quantité du phosphore assimilable et sur la facilité de le prélever par la plante (Vilain, 1997).

1.6 Action des différents facteurs sur la disponibilité du phosphore

1.6.1 Facteurs physiques

- **La texture**

La texture influe sur la disponibilité du phosphore; lorsque la teneur en argile augmente la rétention en phosphore augmente, le type d'argile influe aussi (Badraoui et al, 1995), la kaolinite et les oxydes de fer et d'aluminium retiennent beaucoup plus de phosphore que les argiles de type 2-1. Le phosphore est moins soluble dans les sols argileux que dans les sols sableux.

- **L'aération et compaction du sol**

L'oxygène est nécessaire pour le prélèvement du phosphore par les racines, dans les sols compactes la plante n'absorbe pas convenablement le phosphore, aussi dans les sols compactés, les mouvements de l'eau sont réduits, ce qui a par conséquent de diminuer la diffusion du phosphore vers les racines .

- **La température du sol**

La température influe sur les réactions biologiques et chimiques du phosphore, les températures faibles réduisent le taux de minéralisation du phosphore organique par diminution de l'activité microbienne, aussi elles diminuent la croissance des racines et le taux de diffusion du phosphore. Le développement racinaire et l'aptitude des plantes à absorber le phosphore peuvent être retardés par le climat froid.

- **L'humidité du sol**

Elle est nécessaire pour l'absorption des ions phosphatés par la plante, car la dessiccation diminue la solubilité des phosphates, elle est nécessaire aussi pour les processus de diffusion qui est un moyen important de transport du phosphore dans la solution du sol jusqu'à la surface racinaire (Duthil, 1973). Une certaine humidité est toujours nécessaire pour l'absorption du phosphore par les plantes.

1.6.2 Facteurs chimiques du sol

- **Le pH et les différents cations**

Le pH détermine les formes du phosphore dans le sol. Dans les sols acides les ions H_2PO_4 sont dominants, lorsque le pH augmente il y a d'abord la prédominance d'ions HPO_4^{2-} , ce ci est dû à l'influence de la dynamique d'autres éléments tels que Ca^{2+} , Fe^{3+} et Al^{3+} (Duthil, 1973). En effet le phosphore minéral de la phase solide se divise en deux fractions :

- Sels ou minéraux assez peu solubles.
- Phosphates adsorbés à la surface des particules du sol

En ce qui concerne les sels particulièrement solubles, les plus importants cations responsables de la rétention du phosphore du sol sont : Ca^{2+} , Fe^{3+} et Al^{3+} , les autres cations ont une importance mineur à cet égard.

Les systèmes de réaction suivante peuvent être présent dans le sol :

Phase solide	solution du sol
Phosphate aluminique	$\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Al}^{3+} + \text{H}_2\text{PO}_4^- + 2\text{OH}^-$
Phosphate ferrique	$\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{PO}_4^- + 2\text{OH}^-$
Phosphate dicalcique	$\text{CaHPO}_4 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{HPO}_4^{2-}$
Phosphate octacalcique	$\text{Ca}_8\text{H}(\text{PO}_4)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 4\text{Ca}^{2+} + \text{H}^+ + 3\text{PO}_4^{3-} + 3\text{H}_2\text{O}$
Hydroxyapatite	$\text{Ca}_{10}(\text{OH})_2(\text{PO}_4)_8 \leftrightarrow 10\text{Ca}^{2+} + 6\text{PO}_4^{3-} + 2\text{OH}^-$
Fuorapatite	$\text{Ca}_{10}\text{F}_2(\text{PO}_4)_8 \leftrightarrow 10\text{Ca}^{2+} + 6\text{PO}_4^{3-} + 2\text{F}^-$

Les équations montrent que la concentration en ions phosphatés de la solution du sol dépend de la solubilité des sels signalés, des concentrations en Ca^{2+} , Fe^{3+} et Al^{3+} et du pH de la solution du sol. Le plus soluble des sels cités est le CaHPO_4 , les phosphates de fer et d'aluminium sont peu solubles de même que les apatites.

La concentration en Fe^{2+} , Al^{3+} est contrôlée par $\text{Al}(\text{OH})_3$ et $\text{Fe}(\text{OH})_3$, ce ci veut dire qu'en pH bas (faible concentration OH^-) du sol peut entraîner une concentration élevée en Fe^{3+} et Al^{3+} , en conséquence une faible teneur en phosphore de la solution du sol. L'élévation du pH par le chaulage diminue la concentration en Fe^{3+} et Al^{3+} et augmente la teneur en Ca^{2+} de la solution du sol. Dans la plupart des sols, la concentration de la solution du sol en ions phosphates est à son maximum aux environ des pH 6-7, une élévation du pH entraîne la précipitation du phosphore sous forme de d'apatite $\text{Ca}_{10}(\text{OH})_2(\text{PO}_4)_6$ très peu soluble, le phosphore disponible diminue par conséquence. Le pH agit sur le phosphore par les réactions de protonation et de déprotonation (Hinsinger, 2001).

- **Influence des caractéristiques minérales**

Les sols dérivés des minéraux riches en Al et Fe pauvres en Ca et Mg sont pauvres en phosphore qu'elles fixent fortement, le pouvoir fixateur diminue lorsque Ca et Mg prennent d'avantage d'importance dans la composition minérale du sol.

Dans les sols très riches en CaCO_3 , le phosphore se trouve surtout sous forme d'apatite peu soluble

- **Influence de la matière organique**

La matière organique augmente la solubilité du phosphore dans le sol par deux processus :

- Des ions organiques peuvent occuper les sites de fixation du phosphore dans le sol
- Les ions organiques constituent avec Ca^{2+} , Fe^{3+} et Al^{3+} des complexes.

La matière organique est une source de phosphore, sa minéralisation donne le phosphate assimilable par la plante (Duthil, 1973). La décomposition de la matière organique donne des acides organiques qui dissolvent le phosphore minéral de fer et d'aluminium (Michel et al, 2003).

Dans les sols pauvres en phosphore, la matière organique apportée au sol à un effet adverse, le phosphore organique est immobilisé par les microorganismes.

1.6.3 Action des facteurs biologiques

- **Effet des résidus de production**

L'incorporation des résidus dans le sol augmente l'activité microbienne, le phosphore peut être immobilisé par les microorganismes comme il peut être libéré. Beaucoup de facteurs contrôlent le processus d'immobilisation et de libération du phosphore dont : l'aération du sol, l'humidité, la fertilité, ...etc (Armstrong, 1999).

- **Effet des racines**

Les racines influent par la libération de substances acides permettant la solubilisation des éléments nutritifs du sol et favorisent la structure et le mouvement de l'eau dans le sol.

1.6.4 Effet du pouvoir fixateur

Le pouvoir fixateur augmente avec la teneur en argile et avec l'acidité, les relations de régression n'ont cependant pas de valeur générale, contrairement à une idée reçue, le pouvoir fixateur des sols calcaires n'est pas systématiquement plus élevé que celui des sols de limons

Un pouvoir fixateur élevé conduit à la fixation de grande quantité de phosphore apporté. Le bilan cultural moyen pondéré $\Sigma(F-E)$ (F = fumure, E = exportation) établi après une série de culture, peut servir d'indicateur du pouvoir fixateur qui est d'autant plus élevé que le bilan est négatif (Vilain, 1997)

1.7 Interaction des autres éléments avec le phosphore

P/N : il existe une relation de synergisme entre le phosphore et l'azote. En effet, ces deux éléments sont indispensables pour les fonctions de vie de la plante (photosynthèse, formation des protéines, fixation symbiotique du phosphore, ...). L'azote ammoniacal favorise l'absorption du phosphore par la plante (Leikam et al, 1983).

P/K : il existe un synergisme entre ces deux éléments ; leur présence ensemble augmente la croissance des plantes (Cloué, 1978).

P/S : aussi la relation entre le phosphore et le potassium est de types synergisme pour les cultures fourragères, alors qu'on a observé un effet antagoniste sur le maïs. Cependant,

la présence des sulfates en faibles quantités dans le sol a un effet synergique vis à vis du phosphore.

P/Mg : certains auteurs ont signalé un synergisme entre ces deux éléments sur des cultures de ray-grass, maïs, ...etc., il semble que le Mg entraîne une meilleure dissolution du phosphore dans la solution du sol.

P/Ca : lorsque les cations Ca se trouvent en quantités importantes dans le sol, il y a un effet antagoniste entre le phosphore et le calcium par formation de composés insolubles P-Ca.

1.8 Mode d'action des engrais phosphatés

L'introduction dans le sol d'un engrais phosphaté, quelque soit sa forme, aura par conséquent des modifications chimiques qui touchent aussi bien l'engrais ajouté que le sol qui l'a reçu. Cette propriété résulte du fait que le potentiel chimique du phosphore dans les engrais diffère du potentiel chimique du phosphore présent dans le sol, celui-ci se solubilise, la plante s'en nourrit, c'est l'*effet immédiat* de l'engrais. Cette première réaction rend le phosphore très réactif avec le sol, après la mise en solution des engrais phosphatés, les phénomènes d'adsorption, de fixation et de précipitation surviennent (Gagnon et Beaulieu, 2001) et conduisent à l'établissement d'un nouvel équilibre chimique pour le système sol-engrais. La conséquence pratique agricole de ces réactions est une diminution importante et durable du potentiel de l'élément apporté, de sa possibilité d'entrer dans les racines des plantes par gradient de diffusion et d'une augmentation simultanée peu significatives et souvent peu mesurable du potentiel des ions phosphores dans la solution du sol.

Les principaux facteurs responsables de l'adsorption et de la fixation à court terme sont les oxydes de fer et d'aluminium libres, aussi le calcium et le magnésium sous forme échangeable ou sous forme de carbonates. Étant de charge négative, les argiles et les matières organiques ne contribuent pas directement à la fixation du phosphore. Comme les cations Fe^{3+} , Al^{3+} , Ca^{2+} et Mg^{2+} sont adsorbés à leur surface, ces derniers peuvent contribuer à la rétention des phosphates par le sol (Giroux et al, 1996 in Gagnon et Beaulieu, 2002). À plus long terme, la précipitation du phosphore et sa cristallisation sous les formes minéralogiques peu solubles telles la variscite, la strengite et l'apatite. Il convient donc d'utiliser des engrais phosphatés en synchronisation avec les besoins des cultures, presque la disponibilité du phosphore au moment opportun peut être de courte durée.

2. Le phosphore dans la plante

2.1 Importance et rôle du phosphore dans la plante

Le phosphore est un constituant essentiel des végétaux, il existe dans les plantes en quantité assez minime, 0,5 à 1% du poids de la matière sèche. Il peut s'y présenter soit sous forme minérale, soit sous l'aspect de composés organiques complexes, lécithine, phytine, ... etc. (Diehl, 1975). Il s'accumule surtout dans les graines et dans les organes jeunes (Gros, 1979). En effet l'absorption du phosphore est très rapide au début de végétation, il est nécessaire qu'à ce moment, la plante dispose d'un maximum de phosphates solubles. Le phosphore a un effet favorable sur le développement du système racinaire (Diehl, 1975).

Le phosphore est un facteur de précocité ; au cours de la croissance, l'acide phosphorique joue un rôle de régulateur, il réduit le cycle végétatif (Diehl, 1975).

Le phosphore active la synthèse des glucides (sucres, amidon, cellulose) et leur mise en réserve dans les graines, les fruits les tubercules, ... etc., il améliore la qualité. Sa présence engendre la pureté des jus sucrés et une bonne conservation des fruits. Aussi, il est un facteur de résistance au froid, à la sécheresse, et aux maladies :

- Résistance au froid par suite d'une plus forte teneur en glucide.
- A la verse des céréales résultant d'un meilleur dépôt de cellulose et de lignine.

Il faut noter que le phosphore est l'un des constituants de l'ADN, de la membrane cellulaire associé à des lipides, il forme les phospholipides, c'est à travers ces membranes cellulaires que se produit tous les échanges nutritifs dans les tissus végétatifs et animaux.

Le phosphore est présent dans trois mécanismes de photosynthèse :

- C'est un constituant de la « pompe hydrogène » NADPH.
- C'est un constituant de l'ADP.
- C'est un catalyseur pour la synthèse des sucres.

2.2 Absorption du phosphore par la plante

La nutrition phosphatée des plantes ne peut être assurée que par du phosphore présent sous forme de phosphates H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} (Fardeau, 1993a), la nutrition de la plante en phosphore se fait surtout à partir des formes ioniques dans la solution du sol et le flux de transpiration n'explique que 5% à 10% des quantités prélevées par les plantes au cours de leur

cycles ou période de croissance, les 95% à 90% complémentaires sont libérés de la phase solide par désorption ou dissolution des minéraux durant la croissance (Hinsinger, 2001)..

Les racines extraient le phosphore à partir du « *pool alimentaire* » du sol, cette alimentation s'effectue sur 1 à 2mm au maximum. Au départ la plante prélève le phosphore contenu réellement dans la solution du sol, à mesure que le phosphore est prélevé, il y a des quantités accrues de P passant en solution du pool labile du phosphore la vitesse de dissolution de phosphore non labile est très faible, pour contribuer significativement à la nutrition d'une plante cultivée pendant une saison. Ainsi le phosphore assimilable pour les plantes est celui qui est capable de se dissoudre pendant la croissance de la plante. Ce ci n'est normalement qu'une petite fraction du phosphore total du sol. Le phosphore de l'engrais est généralement plus assimilable que le phosphore du sol.

Dans le cas du phosphore minéral du sol, la libération du phosphore dans la solution fait intervenir la dissolution et la désorption. Elle est favorisée par l'excrétion de protons par la racine, mais aussi par la libération d'acides organiques. En effet, environ 10 % du carbone assimilé par les plantes est libéré dans la rhizosphère sous forme d'exsudats capables de complexer les ions métalliques (Gobat et al, 1998).

Dans le cas du phosphore organique, la libération est favorisée par l'action enzymatique. En effet, les enzymes excrétées dans le sol par les racines, les mycorhizes et la faune bactérienne comptent une large gamme de composés capables d'hydrolyser les molécules organiques riches en phosphore.

Il faut noter que la plante absorbe de petites quantités de phosphore par contact direct des racines avec les éléments de la phase solides

Plusieurs mécanismes permettent l'absorption du phosphore par les plantes :

L'interception racinaire désigne l'absorption des éléments nutritifs par interception par la racine (et les mycorhizes) lors de sa croissance, sans qu'aucun déplacement d'ion ne soit mis en jeu. Dans le cas du phosphore, cet apport n'excède pas 1 % des besoins de la plante (Barber, 1984).

Le flux de masse ou advection est le flux lié à l'absorption d'eau par la plante qui compense ainsi l'évapotranspiration. Le flux d'advection du phosphore ne représente également qu'une faible fraction du phosphore assimilé par la plante (Fardeau, 1981).

La diffusion désigne le mouvement des ions dans la solution, engendré par un gradient de concentration. Dans le cas du phosphore, le prélèvement actif par les racines et, le cas échéant, les mycorhizes entretiennent ce gradient. Ainsi, la diffusion associée à la libération conjointe du phosphore lié à la fraction solide du sol, assure l'essentiel des besoins de la plante.

La quantité du phosphore absorbée par les plantes dépend de l'espèce et de la capacité de cette dernière à prélever cet élément qui dépend largement des caractéristiques de son système racinaire et sa capacité de former des mycorhizes (Lun et al, 2003). Les besoins lors de certain stade végétatif, montaison et épiaison par exemple sont caractérisés par l'appellation « *besoin instantané* ». Le phosphore a un rôle métabolique, le fonctionnement en dépend.

En général, l'absorption du phosphore est à peu près terminée à la fin de la période de croissance maximale, elle reste cependant régulière pendant toute la végétation.

De la faible mobilité du phosphore dans le sol découle deux conséquences relatives à l'alimentation de la plante :

- L'intérêt d'une prospection racinaire du sol de plus en plus possible permettant d'atteindre un maximum de sites nutritifs. Toutes techniques culturales favorisant le développement racinaire améliore ainsi l'alimentation phosphatée des plantes.
- La pratique de la localisation des engrais dans les sols pauvres à pouvoir fixateur élevé, conduisant à une augmentation de la production (Morel, 1996). Les prélèvements du phosphore sont directement liés à la croissance de la plante (Evers, 2002).

La phytodisponibilité du phosphore peut être faible dans le sol, d'où la nécessité d'apport de fertilisants phosphatés.

2.3 Rôle des micro-organismes dans l'absorption du phosphore

2.3.1 Définition des mycorhizes :

Les mycorhizes sont des partenaires fongiques symbiotiques de la plante. Dans les milieux naturels, près de 80 % des plantes vasculaires sont susceptibles de présenter des associations mycorhiziennes (Gobat et al, 1998). De nombreuses modalités de symbiose sont possibles mais le schéma de base est le suivant : la plante, organisme autotrophe, fournit des sucres au champignon et celui-ci contribue à l'alimentation de la plante en sels minéraux.

2.3.2 Mycorhizes et nutrition des plantes

La symbiose mycorhizienne repose notamment sur l'échange nutritionnel. Le champignon fournit des sels minéraux à son hôte. Il accumule en outre des réserves qui sont restituées à la plante dans les périodes de besoin.

Les bactéries et les mycorhizes associés aux racines fournissent H_2PO_4^- qu'ils ont extrait des réserves minérales, et organiques du sol. En échange ; les bactéries et les champignons reçoivent de la plante des glucides, qu'ils sont incapables de synthétiser.

Les mycorhizes sont associés non seulement aux arbres mais à la plupart des plantes cultivées. Leur mycélium incroyablement chevelu augmente considérablement la surface de prospection des racines. Liu (2003) révèle que les mycorhizes peuvent contribuer à la diminution du phosphore du sol.

2.4 Nutrition des plantes en présence et en absence d'apport récent d'engrais phosphaté

2.4.1 Nutrition des plantes en absence d'apport récent d'engrais phosphaté

En absence de fertilisant, la plante extrait une très faible quantité du phosphore dans la phase liquide, la plupart du phosphore extrait par la plante est désorbé de la phase solide du sol vers la solution au cours de la végétation (Fardeau, 1993b).

2.4.2 Nutrition des plantes en présence d'engrais phosphatés récemment appliqué

En présence d'engrais, les plantes disposent de deux ressources nutritives : l'engrais et le phosphore biodisponible. L'apport d'un élément fertilisant ne peut accroître les rendements que si l'élément provenant du sol est le premier facteur limitant le rendement, et que l'engrais utilisé est assimilable, ce principe a deux conséquences :

- La fertilisation est à priori un moyen de maîtrise des rendements
- La fertilisation n'est raisonnablement pas justifiable quand l'élément n'est pas le facteur limitant les rendements.

Les rendements sont fonction du niveau de fertilisation phosphatée. Le coefficient réel d'utilisation (CRU) d'un engrais appliqué à une dose compatible avec l'économie agricole est compris entre 15 à 0%. Ce pourcentage est fonction de :

- La nature des constituants du sol qui contrôlent le pouvoir fixateur
- Le niveau de fertilité du sol, CRU diminue quand le niveau de fertilité croît.

- La culture, les besoins sont fonction de la culture
- Type d'engrais, la solubilité de l'engrais phosphaté et du pH du sol influençant le CRU, ce sont donc 80 à 100% de l'engrais phosphaté apportés l'année qui reste dans le sol

Le **CRU** du phosphore des engrais croît lorsque le temps du contact sol-engrais croît ce qui explique la rareté de l'effet « *vieille graisse* » lorsque le niveau de réserves en phosphore biodisponible sont très faibles, la contribution des engrais phosphatés prélevé par les plantes est comprise entre 0 à 25%, cette contribution peut atteindre 80% si les apports ont été supérieur aux quantités prélevées qui sont le plus souvent inférieurs aux prélèvements. (Fardeau, 1993b).

2.5 Exigences nutritionnelles en phosphore des cultures :

Les exigences en phosphore des plantes cultivées sont très élevées dès le début de la végétation. Il faut donc que le végétal dispose d'une fourniture suffisante de phosphore à partir des réserves du sol et de la fumure, faute de quoi le cycle végétatif sera perturbé sans correction ultérieure possible. Si l'orge ne nécessite pas du phosphore au cours des 4 premières semaines, l'épiaison ne se produirait pas, quelle que soit la quantité de phosphore apportée par la suite.

En général l'absorption du phosphore par les plantes est à peu près terminée vers la fin de la période de croissance maximale. L'importance des exigences en phosphore lors de certains stades végétatifs, montaison et épiaison par exemple est caractérisé sous l'appellation « *besoin instantané* » qui atteignent parfois plusieurs kg de P_2O_5 /ha/jour.

La participation du phosphore dans les processus de croissance, de synthèse et de mise en réserve explique la permanence de son rôle au cours des stades successifs de la vie du végétal et fait comprendre son action bien connue sur la précocité.

Une présence insuffisante du phosphore dans le milieu où le végétal puise son alimentation minérale se traduit le plus souvent par des retards de croissance, un moindre développement, à des accidents végétatifs et à des productions amoindries. Les troubles entraînés par une alimentation phosphatée déficiente apparaissent principalement lors des stades de végétation qui sont les plus exigeants en cet élément ; germination, période de l'installation de la culture, tallage des graminées, ...etc.

Les plantes cultivées ont des exigences annuelles qui se situent entre 40 et 120kg/ha suivant les espèces végétales, le type de production et les potentialités pédoclimatiques, mais

il faut également tenir compte du rythme des prélèvements de phosphore dans le sol pour se soucier, non pas seulement d'une quantité de P_2O_5 à fournir dans le sol, mais également des formes de P_2O_5 dotées d'une action suffisamment rapide pour compléter ou supplier les fournitures de l'horizon cultivé.

Le tableau suivant montre l'exportation de quelques cultures en phosphore.

Tableau I-3 : Exportations en phosphore de quelques cultures

Culture	Nature du produit	Rendement (q/ha)	P_2O_5 prélevé (kg/ha)
Blé	Grain	50	0.9
	Plante entière		1.2
Blé tendre	Grain	40	1.2
	Plante entière		1.8
Orge	Grain	45	0.8
	Plante entière		1.1
Avoine	Grain	40	0.8
	Plante entière		1.1
Maïs	Grain	40	0.8
	Plante entière		1.1
Tournesol	Graine	25	1.3
Betterave sucrière	Racine	500	0.1
	Plante entière		0.18

(Vilain,1997).

La production de 1 g de matière sèche par une plante requiert un prélèvement d'environ 3mg de P (Fardeau et Conessa, 1994)

En période de montaison et d'épiaison, un maïs peut prélever 2 kg/ha/j de P (Sommelier et al, 1996). Avec une concentration de 0,25mg/l de P dans la solution du sol et une humidité du sol de 25% poids.

Le phosphore en solution des 20 premiers centimètres de terre arable représente environ 0,2 kg ha/1 de P. La diffusion du phosphore atteindrait ainsi un flux quotidien 10 fois supérieur à la quantité présente dans la solution.

Aussi, les cultures peuvent être classées selon leur exigence en phosphore comme suit :

Tableau I-4 : Classification des cultures selon leurs exigences en P_2O_5 :

Très exigeante	Betterave, colza, luzerne, pomme de terre
Moyennement exigeante	Blé suivant un blé, blé dur, orge, pois, ray-grass, sorgho
Peu exigeante	Avoine, blé tendre, seigle, soja, tournesol

2.6 Teneur des plantes en phosphore

Les teneurs en phosphore des plantes ne dépassent pas généralement 1% de la matière sèche. Voici la teneur de quelques plantes en cet élément :

Tableau I-5 : Teneurs et exportations moyenne du phosphore par quelques cultures

Cultures	MS %	Exportation kg/ha
Céréale (graine)	0.3-0.4	15-25
Céréale (paille)	0.08	-----
Maïs (graines)	0.25	12-20
Betterave sucrière	0.15	60-120
Pomme de terre	0.2	60-100
Ray-grass	0.3	30-50
Prairie permanente	0.25	25-30

L'analyse végétale nous donne une image sur la fertilité du sol. Les résultats de cette analyse peuvent être interprétés, comme dans le cas du maïs (feuille de l'épi) de la façon suivante :

Tableau I-6 : Interprétation des teneurs en phosphore des feuilles de l'épi du maïs (Vilain, 1997)

P % MS	Interprétation
< 0.20	Très faible, signes de déficience
0.2-0.24	Teneur très faible
0.25-0.20	Nutrition assez bonne, repense possible aux apports
0.30-0.32	Nutrition très satisfaisant, faible repense probable aux apports
0.33-0.34	Teneurs très élevée
0.35-0.38	Teneurs très élevée
>0.40	Teneurs particulièrement élevée

annuler les processus de diffusion et de transpiration, la dégradation de la structure limite également le développement racinaire et par conséquent l'interception des disponibilités potentielles du sol.

Si la couche travaillée représente le volume privilégié pour fournir le phosphore aux cultures à la fois parce qu'elle reçoit les fumures et les restitutions organiques et parce qu'elle est la plus intensément colonisée par les racines. Le sous-sol participe néanmoins également à l'offre du sol et peut éventuellement palier les insuffisances de la couche supérieure. C'est le cas notamment, lorsque le sous-sol est épais, bien drainé et régulièrement entretenu à l'eau. (Gachon et Triboi, 1988)

2.7.2 La demande de la plante

L'absorption du phosphore est étroitement liée à l'activité métabolique du végétale, notamment aux processus photosynthétiques mais aussi respiratoires bien entendu, l'activité métabolique dépend elle-même des conditions d'ambiance dans lesquelles la plante est placée. L'aptitude des espèces et des variétés à absorber le phosphore est contrôlée par les facteurs génétiques.

Il ne semble pas qu'il existe de relation simple entre la quantité de phosphore absorbée par la plante et la biomasse synthétisée. En effet, si le phosphore joue un rôle physiologique majeur sur la synthèse de l'ARN et par conséquent sur la synthèse des protéines et des lipides, on sait que la majeure partie du phosphore se trouve dans les vacuoles cellulaires. Des expériences de Bielecky (1968) cité par Gachon (1988), ont mis en évidence que la croissance été arrêtée aussitôt que les réserves vacuolaires étaient épuisées.

En présence d'une offre phosphatée insuffisante, on enregistre dans le premier temps des variations de la composition plutôt qu'une réduction de la biomasse, traduite par l'accumulation relative des composés azotés de faibles poids moléculaires, ce n'est qu'ultérieurement, quand la déficience se fait plus sévère, que la biomasse est réduite à son tour.

Ces phénomènes sont bien exprimés par la variation de concentration que subit la biomasse lorsqu'on fait varier l'offre du milieu. La complexité de ces réactions entre la phosphore absorbé et la biomasse produite conduit l'agronome à caractériser l'offre du sol en phosphore par *le flux du phosphore absorbé* (quantité de phosphore prélevé au cours d'un même intervalle de temps) plutôt que par la biomasse élaborée (Gachon, 1988).

2.8 Effet de la fertilisation phosphatée sur la teneur en phosphore des cultures fourragères

L'enrichissement de la végétation en phosphore est généralement très inférieur à 1% de matière sèche pour des doses supérieures à 500kg/ha de superphosphate. Remarquons, ici, la nécessité de bien référencer le stade de récolte d'une graminée fourragère puisque les teneurs moyennes sont supérieures à 2.5g de P/Kg de matière sèche, alors que celles de l'herbe au stade pâture sont voisines de 4g de P/Kg de matière sèche. Knauer (1965) donne les résultats de plusieurs expérimentations montrant que la teneur en phosphore des graminées peut doubler sous l'influence de la fumure phosphatée, par exemple, de 1.57g/kg à 3.25g/kg et de 2.15 à 3.38g/kg de matière sèche. L'enrichissement est plus fort que la plante est plus jeune.

Richard (1958) écrit que la fumure phosphatée accroît toujours la teneur en phosphore des foins de prairies permanentes et décrit deux expériences où la teneur est passée de 2 à 2.4g/kg soit un accroissement de 20% sous l'action de superphosphate ou des scories thomas.

Dans le livre « *Productivité des terres* », le même auteur en 1959 donne le résultat de nombreuses expérimentations faites par le service agronomique de la compagnie SAINT-GOBAIN qui montrent que l'action des engrais phosphatés sur la teneur en phosphore des fourrages de prairies naturelles et temporaires « *des fourrages assez bons sont devenus bons ou très bons, les fourrages passables sont devenus bons ou assez bons* ». L'augmentation de la teneur en P dans les foins fertilisés par rapport au foins témoin a ainsi évolué entre 12 à 18% des foins déjà bons, pour des foins pauvres à l'origine, l'augmentation peut s'étaler entre 30 à 40%.

Le ray-grass italiens récolté au stade pâture dans le Finistère, parmi lesquels une forte proportion de tiges au stade de repousses épiées, contiennent en moyenne 4g/kg de matière sèche en phosphore. Au cours de 5 années d'expérimentation (1975 à 1979). La moyenne des teneurs des ray-grass d'Italie au stade pâture se situe généralement entre 3 et 3.8g/kg alors que quelques échantillons atteignent 5g/kg. Il s'agit ici de ray-grass d'Italie semés au printemps et prélevés aux cours des 1^{er} et 2nd pâturages.

Le phosphore améliore la composition organique des plantes de ray-grass, notamment la teneur en facteur de croissance comme par exemple la thiamine.

Conclusion

Le phosphore est considéré avec l'azote et le potassium, comme un constituant fondamental de la vie des plantes, il joue un rôle dans une série de fonction de métabolisme. La dynamique de cet élément dans le sol est assez complexe, ce ci est du à l'existence de qui sont fonction des caractéristiques du sol (pH, présence de cations,...etc) et agissent sur sa biodisponibilité.

Le phosphore est présent dans le sol en état d'équilibre qui peut être déplacé suite à un apport d'engrais phosphaté ou à un prélèvement par la plante, ces dernière ne prélèvent que les formes libres ou dissoutes dans la solution du sol qui ne dépassent pas 2mg/l, les quantités prélevées et les rendements sont fonction de la concentration du phosphore dans le sol.

Chapitre III

Les sols gypseux

CHPITRE II

Les sols gypseux

1 Généralités sur les sols gypseux

Les sols gypseux sont caractérisés par leurs teneurs élevés en gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), qui est un sel soluble (Adams, 2001), rencontré dans les régions arides et semi-aride, sa présence est liée aux conditions climatiques et topographiques, il est répandu dans les régions à régime hydrique xéric, ustic et aridic (Khedemi et Mermut, 2003) où les précipitations sont inférieures à 400mm/an, quantité insuffisante pour lixivier le gypse (Alfaya., 2004 ; Schiote, 2003 ; Frenkel et al, 1986). Van Alphen et Rios Romero (1971) désignent sous sols gypseux, les sols à teneur supérieurs à 2% de gypse, alors que la classification FAO (1998) nomme gypsisols les sols à teneur supérieur à 5% de gypse.

2 Origine

Les origines et le processus d'accumulation de gypse dans le sol, sont liés à la présence d'une source de gypse et de conditions climatiques et topographiques favorables.

Le gypse s'accumule suite à l'évaporation d'une eau minérale et de sa précipitation, il peut être hérité d'un matériau parental ou précipité de solution de sol hypersaturée ; il se dissout en saison humide et se précipite en saison sèche, il peut être transporté par l'eau et par le vent et déposer par la suite.

L'origine des sulfates est la présence de matériau parental riche en soufre (exemple : pyrite) (Adams, 2001). Après altération puis oxydation de matériau parental, il se transforme en acide sulfurique qui en présence de calcaire, réagit avec le CaCO_3 et donne le gypse (FAO, 1990).

Le gypse peut être de différentes origines ; éolienne, lagunaire et colluvionnaire. De ce fait, l'origine des accumulations gypseuses dans le sol est :

- In situ par altération de matériau parental.
- Source océanique résultant de précipitation riche en sulfate.
- Eolienne ou fluvial surplace de gypse, de sédiment riche en sulfate et de l'oxydation du soufre.

L'accumulation du gypse se réalise simultanément avec celle du calcaire (FAO, 1998).

3 Formes d'accumulations gypseuses :

Le gypse peut se dissoudre en saison humide et se cristalliser en saison sèche, il se transforme en forme anhydre, ou en forme semi-hydratée (basanite) à température élevée (70 et 90°C). Le gypse se forme soit par cristallisation de solution aqueuse ou hydratation de la forme anhydre ; il se cristallise en prisme monoclinique, le minéral aura une forme lamellaire, prismatique ; fibreuse ou massive.

Suivant la taille des cristaux de gypse, l'horizon gypsic peut présenter une forme poudreuses ou sableuse.

Le gypse s'accumule sous différentes formes ; pulvérulentes, pseudomycelium, amas, nodule, rose de sable, sable, encroûtement, en croûte massive ou en croûte polygonale. Bureau et Roeder (1960) in FAO (1990) décrivent les formes d'accumulation du gypse en Tunisie comme suit :

- **Amas** : précipitation locale de fines graines cristallines de gypse.
- **Pulvérulente** : poudre, dépôt secondaire de poudre fine non cohérente de gypse.
- **En croûte** : couche de gypse dure et massive.
- **Polygonale** : forme attribuée à la croûte en surface exposée à l'altération, son séchage par évaporation conduit à la formation de fissures verticales (intersections) donnant une structure polygonale.

4 Classification des sols gypseux

4.1 Classification française

Selon la classification française, les sols gypseux sont classés comme suit :

Tableau II-1 : les sols gypseux dans la classification C.P.C.S (1967) par (Aubert, 1965)

Classe	Sous classe	Groupe	Sous groupe
Sols calcimagnésiques	Sols gypseux	Sols gypseux rendziniformes	-
		Sols brus gypseux	Modal à encroûtement gypseux
Sols isohumiques	Pédoclimat frais	Sierozems	A croûte gypseuse
Sols hydromorphes	Minéraux à peu humifères	A redistribution de calcaire et de gypse	A encroûtement ou à nodules

4.2 Classification américaine

Soil taxonomy identifie les sols gypseux selon la présence d'un ou de deux horizons diagnostiques (à forte teneur en gypse), horizon hypergypsiq, ou pétrogypsiq.

Les sols gypseux sont classés dans l'ordre des aridisols, sous ordre des orthides dans le grand groupe des gypsiorthides qui se déviennent en sous ordre suivant :

- Typic gypsiorthide
- Cambic
- Petrogypsic

La clef de soils taxonomy: Classification américaine amendée par l'édition des clefs de soil taxonomy qui classe les aridisols en 5 sous ordre, parmi les quels il y a les gypsides présentant un horizon gypsic ou petrogypsic à moins de 100cm de profondeur et ne présentent pas d'horizon petrocalcic placé au dessous de ces horizons. Les gypsides comportent les sous groupes : petrogypsides, narigypsides, argigypside, calcides, halogypsides.

4.3 Classification FAO

Elle désigne les sols calcicoles et gypsiques. L'horizon gypsic défini par soil taxonomy, détermine les horizons yermosol et xerosols (FAO, 1974). FAO (1998) définit le gypsisols comme étant les sols à horizon gypsic ou petrogypsiq à moins de 10cm de profondeur. Les unités des sols gypsisols sont : petri, hypergypsic, aridic ; hyperochric, skeletal, sodic, argic, haplic (FAO, 2001).

5 Répartition géographique des sols gypseux

5.1 Dans le monde

Les sols gypseux se localisent dans les régions arides et semi-arides. La FAO (1998) estime actuellement la surface des sols gypseux de 100 à 150 millions d'hectares. Ils occupent 18% de la surface de la terre (Agric, 2003). Ces sols se localisent essentiellement dans le nord de l'Afrique, sud et est de l'Europe, et du sud-est de l'Asie (Jafarzadeh et Zinck, 2000). 45% de la surface des sols gypseux se localisent en Chine, Somalie et en Algérie (FAO, 1990). (Tableau II-2 et figure II-1).

Tableau II-2 : Distribution mondiale et extension des sols gypseux

Régions/pays	Surface totale	Terre arables et cultivées en permanence	Terre irrigués	<i>Sols gypseux</i>	
				Surface	%
Bahrayn	68	2	1	6	8.8
Iran	163600	18150	9400	28851	17.6
Iraq	43737	5450	2550	12503	28.6
Jordan	8893	405	63	81	0.9
Kuwait	1782	5	2	355	19.9
Oman	21246	63	58	7649	36
Qatar	1100	5	-	<5	-
Arabie Saoudite	214969	3740	435	20250	9.4
U. A.Emirates	8360	39	5	<1	-
Yémen	52797	1481	360	2931	5.6
Afghanistan	65209	8054	2760	<1	-
China	932641	95975	49872	21056	2.3
Indiana	297319	169650	48000	1500	0.5
Angola	156650	1401	80	61	<0.1
Pakistan	77088	21250	17100	1500	1.9
Ex USSR				27450	-
Algérie	238174	7850	555	7966	3.3
Egypte	99545	2800	2800	10000	10.1
Liban	1023	306	86	<1	-
Libye	175954	2170	470	5000	2.8
Maroc	44630	9920	1258	1116	2.5
Espagne	49944	19656	3453	3500	7
Syrie	18378	5775	906	4095	22.3
Tunisie	15536	4952	285	5250	33.8
Turc	79663	27535	3674	395	0.5
Ethiopie	100000	12650	190	2500	2.5
Mali	122019	2503	78	3050	2.5
Mauritanie	102522	208	49	513	0.5
Nambie	82329	622	6	5328	6.5
Somalie	62734	1030	180	10163	16.2
Sudan	237600	12975	1946	785	0.3
Mexique	190869	24730	6100	1100	0.6
USA	-			1400	-
Australie				23	
<i>Surface totale</i>				186477	

FAO, (1994); FAO, (1990) ; Mashali, (1993) ; Boyadjiev et Vergey (1996) in Jafarzadeh et Zinck (2000).

En sol pauvre en phosphore, l'herbe présente une teneur faible en cet élément. Le taux de phosphore de 0.2% de matière sèche est considéré comme un seuil au-dessous duquel il ne faudrait pas descendre (fourrage de mauvaise qualité et sa consommation par les animaux conduits à des maladies). La teneur en phosphore de l'herbe jeune est élevée (0.3 à 0.4% de P dans la MS).

2. L'offre du sol et la demande de la plante, rôle dans la nutrition phosphatée des plantes.

2.7.1 L'offre du sol

L'absorption racinaire du phosphore s'effectue à partir de la solution du sol placée dans l'environnement immédiat des racines. Sans exclure le passage direct d'ions phosphatés adsorbés sur la phase solide du sol (Jenny, 1953 ; Blanchet, 1962)

Le transfert des ions nutritifs du sol à la plante pourrait résulter d'un seul système d'échanges ioniques ; *sol-solution-plante*. Quelque soit la conception adoptée, en absorbant des éléments nutritifs, les racines se comportent comme un « puit » autour duquel se développe un gradient de concentration ionique alimentant un processus de diffusion compte tenu des très faibles énergies de liaison des ions phosphates avec les adsorbants du sol. La concentration en phosphore dans la solution du sol est toujours très faible, le plus souvent comprise entre 0.005 et 0.3mg/l dans les sols cultivées. Dans ces conditions, le renouvellement de la solution du sol sous l'effet du flux transpiratoire et éventuellement du flux gravitaire, ne peut amener au contact des racines qu'une très faible part des besoins de la plante de l'ordre de 1 à 10%. Aussi, c'est la diffusion qui représente le processus essentiel par lequel s'effectue le réapprovisionnement de la rhizosphère en ions phosphatés à partir des réserves labiles du sol.

L'alimentation d'une culture ne s'effectue qu'à partir des réserves labiles d'un très petit volume du sol ; celui qui entoure les racines dans un rayon de 1 à 2mm au maximum. Les réserves labiles globales du sol doivent donc être largement supérieures aux besoins annuels des cultures.

L'intensité de la colonisation racinaire constitue un paramètre capital dont dépend l'aptitude des espèces (et variétés) à intercepter l'offre potentiel du sol.

Les facteurs physiques du milieu modifient considérablement les processus de transfert et d'interception racinaire, par exemple ; la richesse réduit fortement jusqu'à les

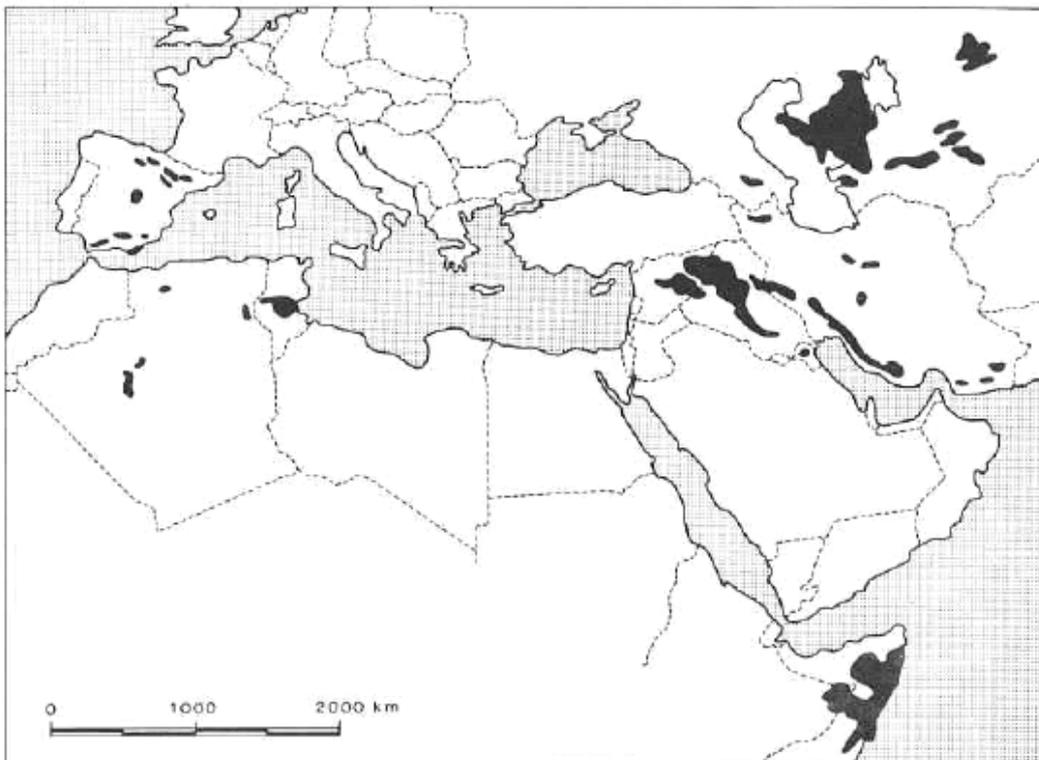


Fig. 1. Distribution of gypsiferous soils in North and East Africa, Southern Europe and South-West Asia

Figure I-1: Distribution des sols gypseux dans le nord est l'est de l'Afrique, sud de l'Europe et dans le sud est de l'Asie

5.2 En Algérie

Les sols gypseux d'Algérie occupent 12.2% de la surface totale des sols gypseux du monde, ils sont estimés à 7966.3km² (représentant 3.3% de la surface du pays) (FAO, 1990).

Durand in Abdessalem (1999) a établie une carte schématisant l'emplacement des gisements des divers types de croûtes en Algérie (figure I-2).

D'après cet auteur les accumulations gypseuses sont répartis comme suit :

- Les encroûtements gypseux fréquents dans le sud de l'Algérie (région de Souf de l'oued Righ et à touggourt) et dans la région de Breziane des grands chotts et de nombreuse sebkha

- Les gypses pulvérulents localisés dans la partie sud du chott Echergui, El-merrir.

Selon Djili (2000), Les accumulations gypseuses dans les sols dépendent de plusieurs facteurs tels que le climat, une source de gypse, les apports externes et la topographie. Ce ci explique pourquoi les sol gypseux se localisent et confinent généralement dans les zones

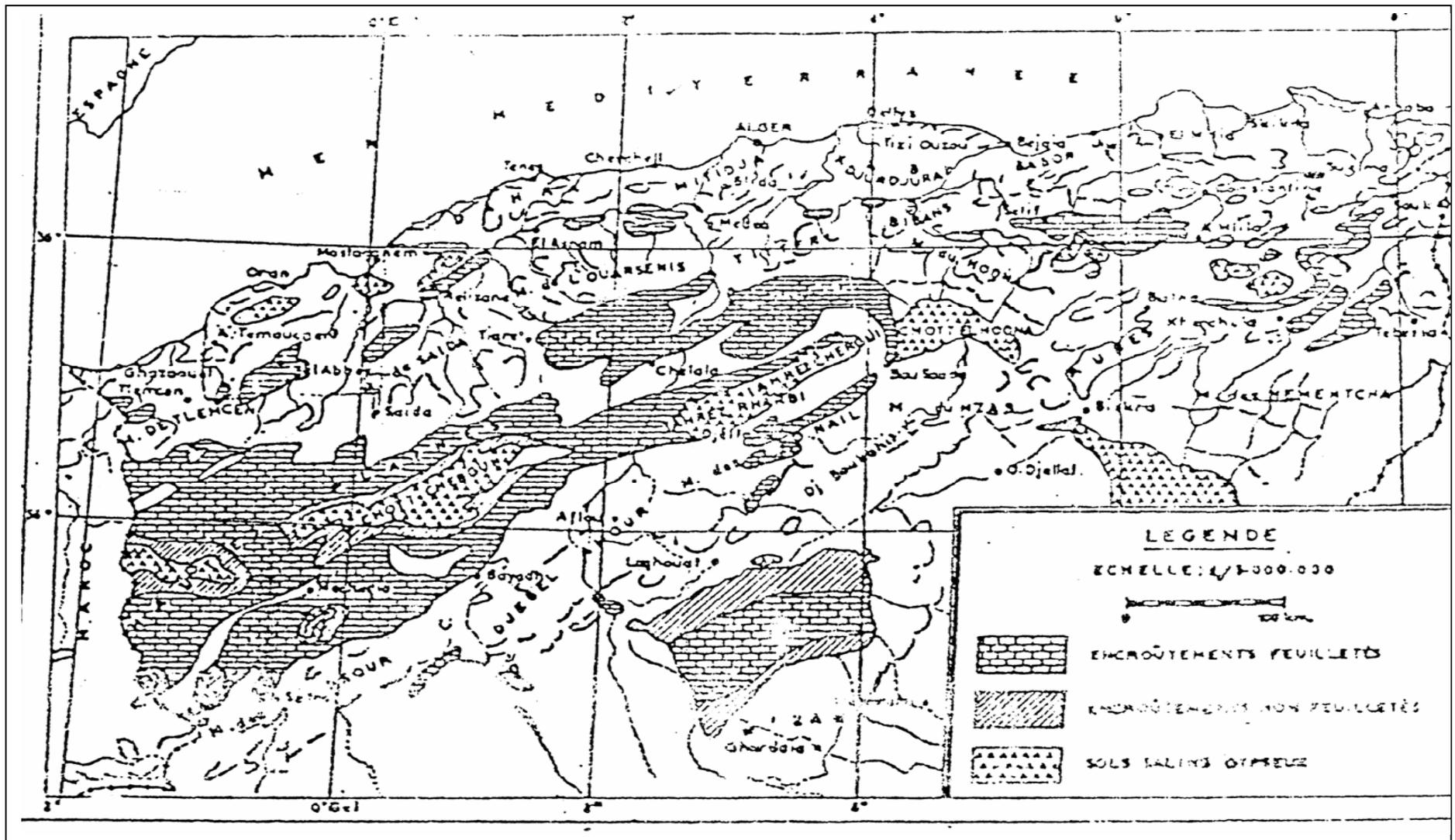


Figure I-2 : Emplacement des divers types de croûtes (Durand, 1953)

dépressionnaires (chotts) et autour des formations géologiques, au niveau l'étage bioclimatique aride au nord du nord d'Algérie. Dans la frange du nord du pays les sols seraient dépourvus en cet élément soit par absence d'une source de gypse ; soit parce qu'il a été lixivié hors du profil par les pluies, c'est ce qui explique sa faible distribution (3.3%). Les sols du nord de l'Algérie s'avèrent peu pourvus en gypse, la distribution des taux moyens du gypse dans le profil est homogène. Ces taux sont respectivement 11.32% en surface et 9.11% en sub-surface et de 11.6% en profondeur. Dans le nord du pays, lorsque la hauteur de pluie augmente, les taux de gypse diminuent. Les fortes teneurs en gypse se localisent particulièrement dans la frange pluviométrique inférieure à 380mm, particulièrement autour de 250mm, et se situent dans les zones arides et semi-arides. On note la présence du gypse dans certaines zones très pluvieuses (Annaba), constitue un cas particulier qui serait lié à un effet d'une micro régionalisation de cet élément (source de gypse localisée, importante, position topographique favorable à son accumulation dans le profil). Le taux de gypse accumulé diminue en s'approchant vers la frange pluviométrique de 450mm.

A l'étage aride les taux de gypse sont assez élevés, ainsi Horta (1980) montre que les croûtes gypseuses se localisent en Afrique du nord et particulièrement en Algérie (FAO, 1990). Au Sahara les accumulations gypseuses sont très répandues et ne sont pas étudiées.

6 Caractéristiques des sols gypseux

6.1 Propriétés physiques et chimiques des sols gypseux

La présence du gypse en forte quantité affecte les propriétés physico-chimiques des sols (stabilité structurale, perméabilité, rétention en eau,...etc.) (Sayegh et al, 1978). Les propriétés des sols gypseux dépendent largement de la teneur en gypse et de la position de la croûte gypseuse dans le profil.

6.1.1 Propriétés physiques

6.1.1.1 Texture

La texture des sols gypseux dépend du matériau parental d'où le sol est dérivé (Van Alphen et Rios Romero, 1971), elle est influencée par la présence de teneurs élevées en cristaux de gypse.

Dans les sols gypseux des régions méditerranéennes les teneurs en argile sont estimées de 2 à 50%, ce large intervalle textural est étroitement lié à la genèse du sol.

La distribution du gypse dans les différentes fractions texturales dépend de la teneur totale en gypse (Vieillefon, 1979). La différence du poids de chaque fraction obtenue après séchage à 50° puis à 105° montre que :

- La fraction inférieure à 20µm est élevée quand la teneur de gypse est supérieure à 10%, et diminue quand le gypse est supérieur à 25%. Elle est constante et petite lorsque le gypse est entre 25 et 40%, et s'élève encore lorsque la teneur en gypse est supérieure à 45%.
- Le taux de la fraction supérieure à 2µm diminue quand la teneur en gypse augmente.

Le gypse se trouve dans toute les fractions, mais il est surtout lié au sable grossier et à la fraction de sable fin (0,05-2mm) suivit par le limon (FAO, 1990). Donc la texture est fortement liée à la teneur en gypse. A de faible teneur en cet élément, la texture est déterminée par le matériau parental. A des teneurs élevées en gypse, il y a formation d'une texture à dominance de sable et de limon en raison d'une cristallisation grossière et d'une diminution de la teneur en argile (Poch, 1992).

Selon Djili (2000), l'augmentation des taux d'argile est accompagnée d'une diminution des taux de gypse, mais le gypse peut se rencontrer en Algérie, dans les sols argileux (marnes, alluvion ; des chotts et sebkha) qu'au sein des sols sableux des régions arides.

6.1.1.2 Structure

Le gypse exerce une influence prépondérante sur les propriétés physiques et chimiques du sol, il agit différemment sur ces caractéristiques selon sa teneur et selon le type du sol. En effet, les faibles teneurs ont un effet favorable sur le sol ;

En sols très argileux et très dispersible le gypse améliore l'infiltration, diminue l'érosion et augmente la floculation (Ventura et al, 2001 ; Viator et al, 1999).

En sols sodiques, Le gypse améliore le structure en déplaçant les ions Na^+ du complexe absorbant et les remplacer par les ions Ca^{2+} , il s'agit de la désalinisation du sol (Peacock, 1998). Jarwal et al (1999) ont apporté à un sol sodique des teneurs croissantes de gypse (0, 2.5, 5, et 10t/ha) et ont montré l'effet bénéfique du gypse.

En sols acides, le gypse change les propriétés de ces sols en déplaçant les ions Al et diminuant la toxicité par cet élément (Farina et al (2000) ; Malcon et Sumner, (1990) ; Tomas et al (1999) ; Wilfried et al (2004).

Sidi et Pansu (1990) ont montré l'effet favorable d'une teneur de 1% de gypse sur la stabilité structurale d'un sol salé et non carbonaté.

Les teneurs entre 3 et 10% de gypse, n'interfèrent pas significativement avec les caractéristiques du sol telles que la structure, la consistance et la rétention en eau, alors que les teneurs entre 10 à 25% de gypse, tendent à briser la continuité de la masse du sol par l'effet des cristaux de gypse. Cependant, les sols à teneurs supérieures à 25% de gypse ne constituent pas un bon support pour les plantes, le sol présente de faibles plasticité, cohésion et agrégation et devient de ce fait complètement instable à l'eau. (FAO, 1990).

6.1.1.3 Densité des sols gypseux

Lorsque le gypse est présent sous forme poudreuse, la densité du sol est faible car le gypse a un faible poids spécifique, aussi la porosité est élevée, alors que les croûtes gypseuses sont dures et présentent une faible porosité

6.1.1.4 Relation sol/eau dans les sols gypseux

❖ La rétention en eau

Van Alphen et Rios Romero (1971) rapportent que les travaux réalisés sur la rétention en eau dans les sols gypseux du massif de Kirovabad, et d'Azerbaïdjan, et des l'ex-URSS publiés par Minashina (1965), montrent que la disponibilité en eau dans la couche superficielle non gypsique est entre 11 à 22% par volume, et dans l'horizon de profondeur où il y a présence d'une couche gypsique avec une teneur supérieure à 80% de gypse, la disponibilité en eau est entre 13 à 22%.

Une étude similaire réalisée par Amami et al (1967) cité par FAO (1990) dans l'oasis de Gabes en Tunisie, sur un sol à texture sableuse avec des teneur de 10% d'argile et 20% de gypse, la disponibilité en eau est entre 10 à 12%.

Dans la vallée d'Ebro en Espagne, un sol à une teneur d'argile avoisinant les 40% et à des taux de gypse de 1 à 9% , Van Alphen et Rios Romero (1971) indiquent que l'eau disponible dans les horizons non gypseux est entre 23 à 38% par volume.

Une étude comparative des caractéristiques hydriques des sol de Hodna en Algérie, du bassin Balikh en Syrie et Karak en Jordanie, a permis de faire ressortir les conclusions suivantes :

- La rétention et la disponibilité en eau sont minimales, lorsque les teneurs en gypse sont aux environs de 25%.
- Lorsque la teneur en gypse est entre 25 et 35%, la rétention en eau dépend des formes de gypse et de la texture du sol.
- Une augmentation de la rétention en eau est notée lorsque la teneur en gypse est au dessus de 35% et au dessous de 10%.

Une irrégularité de la distribution de l'eau dans le profil est notée dans les sols gypseux. Dans les sols à fortes teneurs en gypse (au dessus de 45% de gypse), la distribution de l'eau est uniforme dans les premiers 10 à 15cm de profondeur. Au dessous, l'eau se localise dans les pores de 10 à 20cm de diamètre. Cette irrégularité de la distribution de l'eau dans le profil est due aux crevasses formées caractérisant les horizons hypergypsiques, l'eau est conduite à travers le profil par ces crevasses (FAO, 1990)

❖ **Mouvement de l'eau dans le profil**

Il est moyen à excessif dans la plus part des sols gypseux sauf dans le cas de la présence d'une croûte gypsique verticale ou horizontale qui réduit la conductivité hydraulique.

Ce mouvement de l'eau dans ces sols, qui est parfois excessif, n'est un problème sauf en présence d'une croûte dans le profil.

Après irrigation du sol gypseux, le gypse se dissout et il est transporté, parfois une croûte de gypse est formée. La réduction de l'activité hydraulique peut être due à la précipitation de gypse dans les pores après dissolution.

6.1.2 Propriétés chimiques

6.1.2.1 Solubilité du gypse

a. Solubilité du gypse dans l'eau pure

La solubilité du gypse dans l'eau pure varie selon la température (elle est maximale entre 35 et 40°) en restant environ 2.1g/l (Tableau II-3). La solubilité de la forme semi-hydratée $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ est 5 fois plus grande.

Tableau II-3 : influence de la température sur la solubilité du gypse (Pouget, 1968)

T°c	5	10	18	25	30	35	40	55	75	100	107
CaSO₄	0.1756	0.1926	0.2016	0.2085	0.2095	0.2105	0.2108	0.2083	0.1880	0.1690	0.1630

La solubilité du gypse dépend de la taille des particules, plus ces derniers sont fines, plus la solubilité est élevée (figure II-3) (Van Alphen et Rios Romero, 1971).

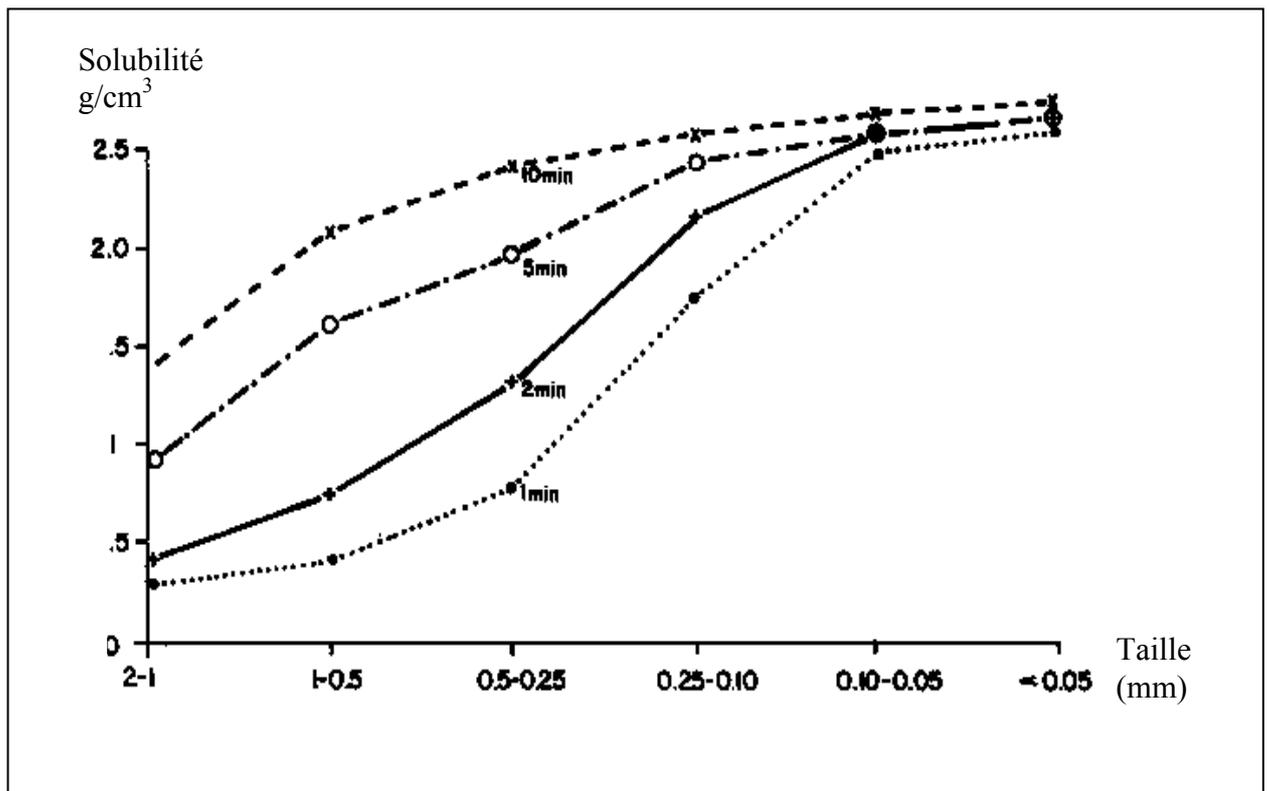


Figure II-3 : Solubilité du gypse selon la taille de ses particules (FAO, 1990)

b. La solubilité du gypse dans les solutions salines

La solubilité du gypse à des températures ambiantes est de l'ordre de 2g/l, augmente jusqu'à 7g/l dans les sols contenant 120 à 130g/l de chlorure de sodium et de magnésium, elle diminue ensuite pour les solutions plus concentrées. C'est l'effet d'ions communs ; la solubilité du gypse diminue. Toutefois, sa solubilité dans les solutions salines se trouve modifier lorsqu'il y a dans la solution des électrolytes forts ayant ou non de ions communs avec le gypse.

- **Action des chlorures** : d'une façon générale les chlorures de sodium et de magnésium augmentent la solubilité du gypse. Cette dernière augmente avec la force ionique de la solution, donc avec les doses croissantes de NaCl (Brusq et Loyer, 1982) ce qui est représenté par le tableau (II-4). Les chlorures de magnésium augmentent la solubilité du gypse dans des proportions comparables et même supérieure à celle des chlorures de sodium (tableau II-5).

Tableau II-4 : Influence de la concentration en NaCl sur la solubilité du gypse

Concentration en g/l							
NaCl	0	2.925	14.62	58.5	131.6	206.7	292.6
CaSO ₄ 14°	1.10	2.79	3.68	5.72	7.20	6.30	5.30
20°	2.10	3.15	4.00	6.00	7.30	6.30	5.30

Tableau II-5 : Action des chlorures de magnésium sur la solubilité du gypse

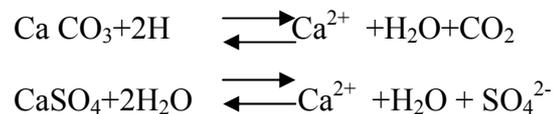
Gramme / litre de solution		
MgCl ₂	CaSO ₄	H ₂ O
0.00	2.08	997.9
8.50	4.26	996.5
19.18	5.69	994.5
46.64	7.59	989.1
121.38	8.62	972.2
206.98	6.57	949.9
337.00	2.77	908.7
441.10	1.39	878.6

- **Action du pH sur la solubilité du gypse**: La solubilité du gypse augmente un peu en sols acides, par suite de la fixation des ions SO₄⁻ par les H⁺ avec formation d'ions H⁺SO₄⁻. La précipitation est moins complète pour un pH neutre ou alcalin.

- **Action des bicarbonates de calcium** : Dans une solution saturée en gypse et en calcaire, une élévation de la tension CO_2 permettant une nouvelle dissolution du CaCO_3 , augmente le nombre d'ions Ca^{2+} et précipite ainsi une certaine quantité de gypse dont la solubilité diminue (Schoeller, 1962 in Pouget, 1969).
- **Interaction gypse- carbonate de calcium**

La plupart des sols gypseux contiennent des carbonates de calcium à différentes teneurs. En effet, les teneurs en carbonates de calcium diminuent quand celle du gypse augmente (Boyadjiev, 1974 in FAO, 1990). Le gypse se lessive car sa solubilité est importante, il s'accumule en profondeur et forment des horizons gypseux, le calcaire très peu soluble reste dans la partie médiane du profil, formant des individualisations visuelles. Halitim (1985) a montré par ces études dans les zones arides d'Algérie, que le gypse est toujours postérieur à la calcite. Le gypse envahit, détruit et bloque l'évolution des accumulations calcaires. La pression de cristallisation du gypse détruit les individualisations calcaires par suite de l'arrivée continue de solutions sulfo-calcique, et de la précipitation de ces dernières à ce niveau.

Dans le système gypse-calcaire avec l'ion Ca^{2+} en commun, la solubilité des deux minéraux et la composition ionique de la solution en équilibre sont dominés par le produit de la solubilité simultanée des deux réactions suivantes :



Le pH des sols gypso-calcaires est déterminé par la solubilité du gypse et du calcaire.

- L'activité du Ca^{2+} est élevée, le pH est plus faible dans le système CaCO_3 -gypse- CO_2 qu'en système CaCO_3 - CO_2
- L'effet de la pression CO_2 sur l'activité du Ca^{2+} est très faible en système CaCO_3 -Gypse- CO_2 que celui en système CaCO_3 - CO_2 .
- La solubilité du CaCO_3 est plus faible en présence de gypse, cela est due à la présence de l'ion en commun.

« De point de vue nutrition des plantes, la présence du gypse dans le sol calcaire a deux effets opposés sur la solubilité et la disponibilité des éléments nutritifs, d'un côté la présence du gypse tends à diminué le pH du sol calcaire et augmente la solubilité des éléments minéraux, exemple : phosphates, oxydes et hydroxydes de fer, zinc et magnésium,

d'un autre côté, l'augmentation de l'activité des ions Ca^{2+} de la solution du sol due à la présence du gypse aboutit à une interaction entre Ca^{2+} et les autres cations, exemple : Zn, Fe et Mg et diminue leurs disponibilité aux plantes» (FAO, 1990) .

6.1.2.2 La capacité d'échange cationique

La CEC est inversement proportionnelle à la teneur en gypse ; quand la teneur en gypse augmente, la teneur en composés non gypseux diminue (argile par exemple) (Van Alphen et Rios Romero, 1971); en effet la CEC dépend de la présence de matière organique, de la texture du sol. Le gypse n'est pas de charge négative, c'est un sel neutre. Par exemple, les sols gypseux du bassin Balikh en Syrie présentent les CEC suivantes :

Tableau II-6 : Relation entre la teneur en gypse et le CEC (FAO, 1990)

Gypse %	0	40	25	50	75	100
CEC meq/100g de sol	24	21	18	11	5	0

Il existe une corrélation négative entre la CEC et la teneur en gypse, l'équation de régression est :

$$\text{CEC meq/100g} = 16.46 - 2.16 \text{gypse} \quad \text{avec } r^2 = 0.708. \text{ Djili (2000)}$$

La CEC dépend du taux de matière organique, de la texture et de la nature des minéraux argileux. Dans les sols gypseux, Van Alphen et Rios Romero (1971) ont signalé :

- Une faible teneur en matière organique, d'où une faible contribution de celle-ci à la CEC.
- Un taux d'argile dépendant du matériau original. Pour les gypsiorthides (présents en Algérie, Dekkich (1976) in FAO (1990)), la teneur en argile excède rarement 20%, une CEC de ce fait varie de 7 à 14 meq/100g du sol.
- Le type d'argile influe sur le caractère physico-chimique du sol : CEC, structure, capacité de rétention, ...etc.

L'*attapulgit* est commune en horizons gypsic et petrogypsic, représente un taux de 40 à 80% de la teneur totale d'argile dans les horizons gypsic des sols iraqiens. Il existe une relation de type linéaire entre le gypse « y » et la teneur en attapulgit de la fraction argileuse :

$$Y = 0.89X + 15.85 \quad r^2 = 0.963 \quad (\text{FAO, 1990}).$$

D'autres minéraux peuvent se trouver aussi dans les sols gypseux, exemple de *sépiolite* et *kaolinite*.

6.1.2.3 Composition du complexe absorbant et de la solution du sol

Le complexe absorbant et la solution du sol sont saturés en ions Ca^{2+} et SO_4^- , la teneur de Mg^{2+} et K^+ échangeable dépend de la CEC. Dans les sols gypseux les rapports Mg/Ca et K/Ca sont faibles. Le cation échangeable dominant est le calcium, suivi par le Mg, K et parfois le Na. Van Alphen et Rios Romero (1971).

6.1.3 Propriétés thermiques

➤ Formes de déshydratation du gypse

Dans les milieux géologiques, les deux formes gypseuses sont rencontrées : la forme hydratée $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et la forme anhydrite CaSO_4 (forme déshydratée), il existe aussi des formes de déshydratation intermédiaire (Coque, 1962 in Vieillefon, 1979), forme semi-hydratée $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$. L'allure des phénomènes de déshydratation dépend de plusieurs facteurs dont : la température, et surtout la vitesse d'échauffement, la tension de vapeur et leurs interactions.

La déshydratation se réalise à des températures relativement peu élevées. Commence à 40° et s'accélère à 60° pour donner le plâtre. La réhydratation à l'eau est aisée.

7 Problèmes d'analyse des sols gypseux

Les méthodes d'analyse des sols s'appliquent difficilement aux sols gypseux, surtout en ce qui concerne la granulométrie, les mesures d'humidité et de pF en raison des propriétés du gypse : solubilité non négligeable, densité plus faible que celle des autres constituants minéraux des sols, facilité de déshydratation et d'hydratation, ce qui peut fausser l'analyse (Vieillefon, 1979). On note alors des difficultés de mesure de la CEC (Busher et Fritton, 1978 ; Frenkel. et al, 1986), du dosage du gypse, ... etc.

- ***Difficulté de détermination de la CEC et des bases échangeables***

Par sa solubilité, le gypse libère des ions Ca^{2+} , ce qui conduit à une surestimation des bases échangeables, surtout le calcium.

- ***Difficultés du dosage du gypse***

Plusieurs méthodes sont utilisées pour le dosage du gypse dans le sol (méthode Bower et Huss (1975) ; méthode Nelson et al (1965); Vieillefon, (1979), mais notent certaine

contrainte qui peuvent se produire lors de l'analyse (présence d'autres sels de SO_4^- et de Ca^{2+} autre que le gypse ; difficulté de solubiliser tout le gypse présent, la présence de gypse sous plusieurs formes, ...etc). (FAO, 1990).

- ***Difficulté de la mesure de l'humidité***

La méthode classique ne convient pas aux sols gypseux, elle surestime l'humidité dans ces sols par déshydratation de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Poujet, 1968)

8 Relation entre la présence du gypse et la production agricole

Le gypse agit différemment sur les productions agricoles selon sa teneur, sa forme, sa distribution verticale et horizontale dans le profil et la profondeur des accumulations. D'une façon générale, le gypse est considéré comme amendement en l'apportant à des faibles teneurs. Par contre, les fortes teneurs de gypse peuvent avoir des effets néfastes sur les propriétés physico-chimiques du sol et donc sur les rendements agricoles.

8.1 Le gypse tant qu'amendement

Van Alphen et Rios Romero (1971) considèrent que les teneurs inférieures à 2% de gypse sont favorables au sol, le gypse améliore la stabilité structurale des sols salés (Sidi et Pansu, 1982), c'est une source de calcium et de sulfates pour les plantes. Selon FAO (1998) un sol est dit gypseux lorsque la teneur en gypse est supérieure à 5%, donc, à une teneur inférieure le gypse est sans effets néfastes. Jarwel et al (1999) ont constaté l'effet positif des teneurs croissantes de gypse sur quelques productions agricoles en sol sodic

8.2 Le gypse, une contrainte agricole

La plupart des études expérimentales visant de déterminer l'effet du gypse sur les cultures sont réalisées soit sous-serre ou au laboratoire, les études sur champ sont rares. Cependant, l'effet du gypse dépend de la teneur du sol en cet élément « *effet quantité* ». Van Alphen et Rios Romero (1971) rapportent d'une façon générale que la productivité agricole diminue quand la teneur en gypse augmente. Des études ont montré que la croissance du maïs devient faible quand la teneur en gypse est près ou supérieure à 50% (Hernando et al, 1963). Quand la teneur en gypse est entre 15 à 30% la productivité agricole n'est pas affectée (Akhavaldiani, 1965 in FAO, 1990). En Iraq une teneur de 25 à 50% fait diminuer la croissance des plantes. En Tunisie une teneur supérieure à 30% est toxique pour les plantes (Bureau et Roeder, 1980 in par FAO, 1990). Van Alphen et Rios Romero (1971) montrent que les teneurs de gypse entre 2 à 25% ont un faible effet si le gypse est sous forme

pulvérulente. Hernando et al (1963, 1965) dit par FAO (1991), en étudiant l'effet des teneurs croissantes de gypse, (jusqu'à 75%), sur le maïs (irrigué à 80% la capacité au champ), ont constaté la diminution de la croissance des plantes. Selon Jafarzadeh et Zinck (2000), les teneurs supérieures à 40% en gypse sont peu convenables à l'agriculture, et pour Barzanji et al (1981), le sol peut être un facteur limitant pour la production végétal lorsque la teneur en gypse est supérieure à 50%.

Boyadjiev et Verhey (1996) ; Jafarzadeh et Zinck (2000) classent les teneurs en gypse dans la rhizosphère en 5 classes :

- 0 à 3% basse
- 3 à 10% moyenne
- 10 à 25% moyenne à élevée
- 25 à 40% élevée
- > à 40% très élevée.

8.2.1 Effet des propriétés physiques du gypse sur la production agricole

L'effet des propriétés physiques du gypse sur le sol se manifeste par les problèmes de l'érosion, de résistance mécanique à la pénétration racinaire, la perméabilité et de rétention en eau.

La présence d'une couche de gypse dure ou de croûte gypseuse construit un obstacle mécanique pour l'extension racinaire, donc il y a un problème d'exploration du sol par les racines, les mouvements de l'eau sont ralentis (Mashali, 1996). En effet, il existe une relation entre la résistance mécanique, la pénétration racinaire et l'élongation des racines, quand la teneur en gypse est élevée, ce dernier constitue une structure cimentée faisant obstacle au développement des racines. La formation des croûtes de gypse répandues dans les régions à précipitation inférieure à 250mm/an, par leur existence il y a diminution de l'infiltration, la germination des semences est faible (Jafarzadeh et Zinck, 2000).

Selon Mashali (1996) quand la teneur en gypse est supérieure à 50%, il y apparut ces problèmes de résistance mécanique à la pénétration racinaire, le sol a une faible capacité de rétention en eau. Ainsi les mouvements de l'eau, la perméabilité, la stabilité structurale, la cohésion, l'agrégation et les propriétés chimiques seront par conséquence affectés :

- La solubilité du gypse est l'une des qualités les plus défavorables des sols gypseux, causant des problèmes physique et chimique touchant la fertilité (faible teneur en élément nutritifs et leur disponibilité), ce qui réduit les rendements.

- L'érosion des sols gypseux est un vrai problème résultant de la faible agrégation due à la faible cohésion entre les particules du sol.
- La dissolution du gypse et son transport dans le profil durant l'irrigation ou après précipitation influe sur la plasticité, l'agrégation et la texture. Quand le gypse co-existe avec le calcaire, le gypse est lexivié, ce qui conduit à une augmentation de la plasticité et une diminution de la cohésion.

Les mouvements de dissolution, recristallisation en sols cultivés et irrigués conduisent à la formation d'une croûte ou encroûtement du gypse dans le profil. Aussi, le gypse peut se cristalliser autour des racines, ce qui réduit leur capacité à extraire l'eau et les éléments nutritifs, ce phénomène est observé sur les cultures pérennes et les arbres.

Ces propriétés défavorables entraînent la baisse de la disponibilité de l'eau et l'effondrement des canaux d'irrigation. La capacité de rétention en eau diminue lorsque la teneur en gypse augmente, ce qui dépend de la structure, de la texture, et de type de l'argile et des cristaux de gypse, l'évaporation et l'extension racinaire.

8.2.2 Effets des propriétés chimiques du gypse sur la production agricole

Selon Mashali (1996), la présence de teneur élevées en gypse dans la rhizosphère affecte la teneur et la disponibilité des éléments nutritifs par :

- Changement de la forme de l'élément nutritif dans le sol ; l'élément se trouvant sous forme disponible devient indisponible, cas du phosphore qui se transforme en forme inassimilable en présence de gypse.
- Perte d'élément nutritif (cation et anion) ; la solution du sol a une grande concentration en Ca^{2+} ce qui conduit à une libération successive du K et Mg du complexe absorbant.
- Les teneurs élevées en gypse peuvent conduire à un déséquilibre des rapports ioniques particulièrement K/Ca et Mg/Ca qui deviennent faibles dans les sols gypseux.
- La compétition ionique des ions supplémentaires affectant la nutrition ; la présence en concentration élevée d'un élément diminue les prélèvements par la plante d'autre élément tel que : K, Mg, Fe, Cu, Zn, phosphate et nitrate.

- L'élévation de la pression osmotique due à la solubilité du gypse, ce qui réduit l'extraction de l'eau et des éléments nutritifs par la plante (Ray et al, 1992).
- La relation inverse entre la teneur en gypse et la CEC dans le sol (le gypse n'absorbe pas ou libère les éléments nutritifs); la diminution de la fertilité des sols gypseux est due à la faible capacité d'adsorption des éléments.

8.2.3 Impact biologique de la présence du gypse

Le gypse affecte la teneur en éléments nutritifs des plantes (FAO, 1990). Les plantes réparent différemment à l'excès de SO_4^{2-} et Ca^{2+} , l'augmentation de la pression osmotique dans le sol conduit à une toxicité spécifique des plantes par l'excès de sulfates et de calcium, entraînant la formation de paysages particulier soit occupée par une végétation naturelle spécialisée, soit absence total de végétation (Loyer, 1991). En effet, l'effet du gypse sur les plantes dépend de la capacité de ces dernières à tolérer sa présence. Mashali (1996) classe les plantes selon leur tolérance au gypse comme suit :

- Plantes sensibles: tabac
- Plantes semi-sensibles: coton, pomme de terre, tournesol
- Plantes semi-tolérantes: fève, betterave, canne à sucre, sorgho
- Plantes tolérantes: soja, sésame.

Les plantes sensibles et semi-sensibles peuvent vivre dans des sols à des teneurs inférieure à 15%. Les plantes tolérantes peuvent supporter des teneurs supérieures à 25% (forme continue du gypse). (Boyadjiev et Verheye, 1997).

9 Le phosphore dans les sols gypseux

9.1 Fertilité des sols gypseux

L'accumulation du gypse dans le sol a pour conséquence la baisse de la fertilité de ce dernier et des rendements, ce ci est le résultat des propriétés physico-chimiques défavorable dans ces sols et d'un déséquilibre dans le prélèvement des éléments nutritifs par les plantes (Van Alphen et Rios Romero, 1971).

Les couches superficielles des sols gypseux sont pauvres en azote et en phosphore. L'azote total est estimé de 50 à 260mg/100g de sol. Le phosphore, extrait par HCl à 20% à chaud, est estimé de 13 à 52mg/100g de sol. Le K extrait à HCl est de 200 à 700mg/100g de sol, cette quantité convient au besoins de la plupart des cultures.

Les teneurs en éléments majeurs et en oligo-élément sont faibles en sols gypseux, tels que le manganèse, le cuivre, le zinc et le molybdène, même après apport d'engrais (FAO, 1990).

9.2 Effet de gypse sur l'azote et la matière organique

La teneur des sols gypseux en matière organique est relativement faible, entre 0.4 à 1% dans la couche superficielle et inférieure à 0.2% dans la couche profonde. Le type de composés organiques et d'humus sont affectés par la présence de gypse dans le sol.

Le taux de la minéralisation de l'azote est stimulé par l'addition de gypse en sols salins non gypseux à une quantité de 2.5 à 5T/ha. Le gypse apporté en faible quantité stimule les micro-organismes responsables de la minéralisation Gupta et Salaran (1971) in FAO (1990) ont trouvé que l'addition du gypse stimule les populations de champignons dans les sols salins et les sols sodic, et diminue le nombre des actinomycètes. Van Alphen et Rios Romero (1971) notent que la couche superficielle des sols gypseux d'Espagne contiennent généralement moins de 0.25% d'azote total. La couche superficielle des sols gypseux peut être pauvre en azote (entre 0.07 et 0.15% dans la vallée d'Euphrate).

Les quantités élevées de gypse dans le sol jouent un rôle inverse, il y a une diminution de la minéralisation de l'azote (Badia, 2000), la salinité diminue l'activité de certains enzymes qui interviennent dans la minéralisation, l'activité et la masse microbienne diminuent.

Sidi et Pansu (1982), ont étudié l'effet d'une teneur de 1% de gypse sur un sol salé carbonaté et montré que cette teneur de gypse favorise l'activité microbienne et la minéralisation de la matière organique et de l'azote.

9.3 Effet de gypse sur le potassium et les microéléments :

L'augmentation de la concentration du calcium dans la solution du sol engendre la libération du potassium et du manganèse du complexe absorbant et la diminution des quantités absorbées par la plante

Pour les microéléments, leur présence est rare en sols gypseux. La couche gypseuse contient une faible quantité en Mn, Cu, Zn, et Mo.

Lorsque la couche gypsique est à une faible profondeur, il y a diminution de la fertilité des sols, la fertilisation de ces sols devient essentielle.

9.4 Fertilité phosphatée des sols gypseux

En général, les sols gypseux sont pauvres en phosphore. En Iraq les couches de surface contiennent 20mg de $P_2O_5/100g$ de sol (extrait à l'HCl concentré), c'est une très faible teneur. D'après Smith et Robeston (1962), les sols gypseux de la vallée d'Ebro en Espagne sont faiblement pourvus en phosphore à 60cm de profondeur et plus, alors qu'à une même profondeur, un sol récemment irrigué contient 70 à 120mg de $P_2O_5/100g$ de sol. En revanche, un le sol qui n'été pas irrigué contient une quantité de 10mg de $P_2O_5/100g$ de sol.

9.5 Méthode d'étude du statut phosphatée utilisé déjà

Pour étudier le statut et la distribution du phosphore dans les sols gypseux on procède selon deux méthodes:

a. Méthode chimique : Il s'agit, comme pour les autres sols de déterminer la quantité du phosphore assimilable présente dans le sol par l'extraction chimique.

- **Extraction du phosphore assimilable :** différentes méthodes sont utilisées, les plus convenables pour les sols alcalins et gypseux sont la méthode Joret-Hebert et la méthode Olsen. Mais c'est la méthode Olsen qui donne une image proche de la réalité sur la fertilité phosphate du sol, car elle extrait les formes de phosphore absorbées par la plante.
- **Fractionnement :** consiste à déterminer les différentes formes du phosphore inorganique dans le sol et le pourcentage de chaque forme par rapport au phosphore total, c'est la méthode Chang et Jackson qui est utilisée (Gachon, 1972 ; Muhammed et Jones, 1992). Le but du fractionnement est de mieux cerner le comportement du phosphore dans le sol.

b. Méthode physique : Il s'agit de la méthode de diffractométrie aux rayons X (FAO, 1990). Panahi Kordlaghari (1991) compare la composition d'une solution de gypse après réaction avec le phosphore, à un diagramme de solubilité du minéral de phosphate de calcium, ce qui informe sur la nature du composé P-Ca formé. Ou encore effectuer une observation direct sous microscope à transmission d'électrons développé par Rodier et Robert en (1995) qui ont montré que dans les sols calcaires, il y a prédominance des particules P-Ca (Badraoui et al , 1995).

9.6 Immobilisation du phosphore dans les sols gypseux

Dans les sols gypseux, il y a des quantités élevées d'ions Ca^{2+} dans la solution du sol (Jarzadeh et Zinck, 2000 ; FAO, 1990). En effet, la solubilité du phosphore dans le sol dépend de l'activité des ions Ca^{2+} , Fe^{3+} , et Al^{3+} et du pH. Les composés contenant les ions Ca^{2+} , Fe^{2+} et Al^{2+} affectent la solubilité du phosphore dans le sol, tels que la calcite, le gypse, la gibbsite, ...etc. La formation du complexe P-minéral affecte la concentration du phosphore. L'activité des ions minéraux dépend du pH du sol, du potentiel redox et de la pression partielle du CO_2 . La solubilité du complexe P-Ca croît en fonction du CO_2 (Hardson, 1984 in FAO, 1990). Quand le gypse co-existe avec la calcite, cas de la plupart des sols gypseux, l'activité des ions Ca^{2+} est beaucoup plus élevée qu'en sols comportant la calcite seule. La disponibilité et la solubilité du phosphore sont plus faibles en sol gypseux qu'en sols calcaires. La diminution du phosphore labile dans le sol peut être le résultat de la formation du complexe P-Ca cristallin. Vu la forte activité des ions Ca^{2+} dans les sols gypseux, la rétention du phosphore est plus élevée.

Une étude menée par Muhammed et Jones (1992) sur les sols gypseux de l'Iraq et du sud de l'Espagne sur le statut phosphorique de ces sols, a révélé que la concentration du phosphore total et les différentes fractions du phosphore inorganique diminuent avec la profondeur dans tous les profils étudiés. Par la méthode Chang et Jackson, ces auteurs ont réalisé que la plupart du phosphore existe sous la forme de P-Ca. Les formes de la fraction du phosphore inorganique exprimées en pourcentage du phosphore total diminuent dans l'ordre : P-Ca > P extractible réduit > P-Al > P-Fe > P org > P extractible à NH_4Cl .

Aussi Panahi Kordlaghari (1997) a déterminé l'effet du gypse sur la solubilité du phosphore; d'abord la réaction d'une solution phosphatée avec le gypse est étudiée à pH 4,5-5,5, l'adsorption du phosphore est faible (inférieure à 40mg/l). Quand le pH augmente de 6,5 à 9,5, l'adsorption augmente proportionnellement. Pour identifier la réaction produite. Une solution de phosphate est apportée à une solution de sulfate de calcium à pH 6,5 et 7. La diffractométrie aux rayons X des produits précipités montre la présence de traces de phosphate dicalcique dihydraté. La comparaison de la composition de la solution, après réaction, avec le diagramme de solubilité des phosphates calciques montre que la solution est probablement en équilibre avec le phosphate octacalcique.

Cette réaction déplace beaucoup de phosphore de la solution à pH élevé (le pH élevé et la présence de Ca^{2+} sont la cause).

Panahi Kordlaghari et Rowell (2006) ont montré l'adsorption du phosphore sur le gypse.

L'addition du gypse au sol a un faible effet sur le pH mais augmente la rétention en P.

La rétention du phosphore dans les sols gypseux a été étudiée, les déplacements du gypse diminuent l'adsorption du phosphore, suite à la diminution des ions Ca^{2+} en surplus. Le gypse source de Ca^{2+} ainsi que la calcite, causent l'augmentation du pH et la rétention du P qui aboutit à une déficience en phosphore assimilable.

9.7 Effet de la quantité de gypse sur l'immobilisation du phosphore

L'immobilisation du phosphore est significativement plus élevée en sols à 40% de gypse qu'en sol à 5% surtout dans les premières périodes qui suivent l'apport de l'engrais phosphaté (figure I-4).

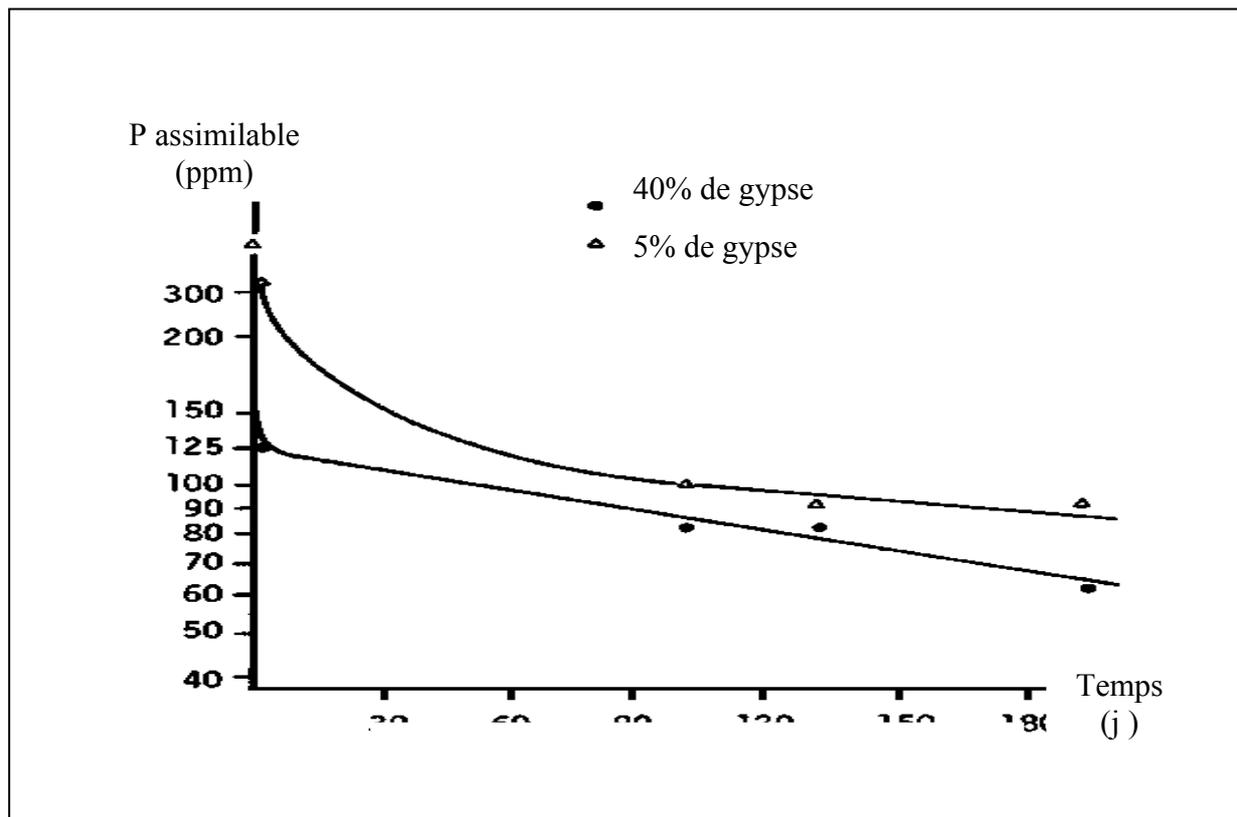


Figure II-4: Taux d'immobilisation du phosphore dans un sol à 5% de gypse et un sol à 40% de gypse (FAO, 1990)

En générale les sols gypseux ont une teneur en phosphore assimilable plus faible que celle des sols calcaire (figure II-5) et doivent être fertilisé (FAO, 1990)

9.8 Biodisponibilité du phosphore dans les sols gypseux

Il existe une relation significative entre le phosphore prélevé dans les sols gypseux par le maïs et l'orge et la teneur en gypse (FAO, 1990). Le prélèvement du phosphore par le maïs (dans un sol fertilisé en phosphore) diminue très significativement avec l'augmentation de la teneur en gypse. (Tableau II- 7)

Tableau II-7 : Effet des teneurs élevées en gypse sur le prélèvement du phosphore pour le maïs et l'orge.

Gypse %	Concentration de P dans la matière sèche %	
	Feuilles de maïs	La plante d'orge
0	0.636	0.355
5	0.323	0.291
10	0.348	0.260
20	0.320	0.280
40	0.191	0.99

Le prélèvement du phosphore par l'orge (plante tolérante au gypse) est in affectée par les teneurs élevées en gypse. L'effet du gypse sur le prélèvement du phosphore par la plante dépend de:

- l'espèce cultivée ; tolérante ou non
- la concentration du phosphore dans le sol
- la teneur en gypse du sol

La figure suivante montre l'effet du gypse sur la croissance relative des feuilles et des racines du tabac

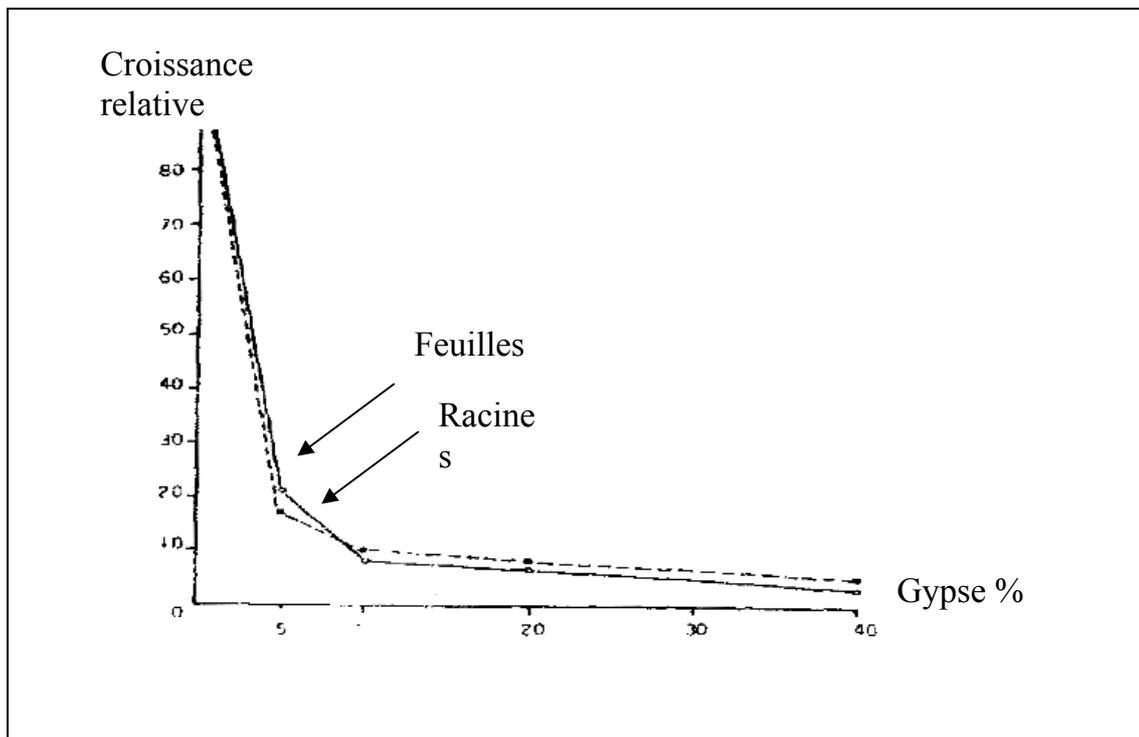


Figure II-6 : Effet du gypse sur la croissance relative des feuilles et des racines du tabac

Conclusion

La présence de gypse en grande quantité dans le sol affecte les qualités physico-chimiques de ce dernier, baisse la fertilité et par conséquent les rendements agricoles. Les teneurs des sols gypseux en éléments nutritifs des sols, surtout en phosphore assimilable sont faibles, ce ci est lié à sa dynamique qui dépend des caractéristiques du sol.

La biodisponibilité du phosphore sous l'influence des différentes teneurs en gypse doit être étudiée car peu d'étude sont réalisées sur la fertilité des sols gypseux.

Deuxième partie

Etude expérimentale

Chapitre I

Materiel et methodes

Chapitre I

Matériel et méthodes

1 Objectif de l'étude :

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de teneurs croissantes de gypse sur la dynamique du phosphore et sa cinétique d'absorption par une plante test dans un sol non salé et non calcaire, afin de déceler l'effet seul du gypse, et de montrer le seuil à partir duquel le phosphore n'est plus disponible, ainsi que les possibilités de fertilisation.

2 Principe :

Le travail est basé sur le principe de Chaminade (1960) et la méthode Stendford De-Ment (1958), qui permettent d'étudier la fertilité phosphatée à court terme au laboratoire, utilisées par plusieurs auteurs dont Quemener, 1968), Gachon (1988), Prost (2000), Lambert (1992), Guivarch (2001).

Il s'agit donc d'étudier la dynamique du phosphore, de pratiquer une culture de ray-grass en pots sur un sol à différentes teneurs en gypse (0, 5, 10, 20, 40%) et doses d'engrais phosphatés (D0, D1, D2). Un suivi de l'évolution du phosphore assimilable et de son absorption par la plante en fonction du temps (21j, 36j et 51j après le semis) est réalisé. Effectuer, alors, 3 coupes du végétal avec 3 prélèvements simultanés de sol à des intervalles de 21, 15 et 15 jours.

Ce travail est divisé en deux parties :

- Etude de l'influence des teneurs croissantes de gypse sur le pouvoir fixateur du sol en phosphore et sur la dynamique de ce dernier.
- Etude de l'influence des teneurs croissantes de gypse sur de la cinétique d'absorption du phosphore par le ray-grass.

2.1 Méthode de détermination du pouvoir fixateur et de la dynamique du phosphore

2.1.1 détermination du pouvoir fixateur

Le pouvoir fixateur est déterminé par deux méthodes :

a. Méthode d'extraction au CaCl_2

Par la détermination de la concentration du phosphore dans la solution du sol (Esilaba et al (1992), Vilain (1997) ; Fardeau et al (1988), McDowell et Sharpley (2003). La différence

entre la concentration obtenue et la concentration maximale (2mg/l) du phosphore que la solution du sol peut contenir représente la quantité que le sol peut fixer.

b Méthode de BLAKEMORE

Cité par anonyme (1995) ; il s'agit de mettre en équilibre la solution du sol avec une solution phosphatée de 1000mg/l de phosphore, et de doser le phosphore inassimilable.

2.1.2 Etude de la dynamique du phosphore

Il s'agit d'étudier l'effet de quantités croissantes de gypse, apportées à un sol non salé et non gypseux sur la dynamique du phosphore. Les teneurs en phosphore assimilable seront déterminées par deux méthodes d'analyse; la méthode Joret hebert et la méthode Olsen.

2.2 Appréciation de la disponibilité du phosphore par la culture du ray-grass

2.2.1 Méthodologie d'étude :

La méthode adoptée est celle de culture en pots avec l'utilisation d'une graminée qui permet de pratiquer des coupes successives dont les teneurs en phosphore sont déterminées, données qui fournissent une image sur la cinétique d'absorption de cet élément, image imparfaite dans la mesure où les racines et les collets stockent une partie des prélèvements. Par l'analyse de ces organes au cours et en fin de l'essai, il est possible de mesurer le phosphore immobilisé dans les organes végétaux.

❖ *Choix de référence biologique de l'offre potentiel du sol*

Pour refléter intrinsèquement l'offre potentiel du sol, la référence biologique devrait éliminer l'interaction de tout paramètres autre que le phosphore sur le processus de la croissance et du développement. Cet impératif de recourir à des données expérimentales recueillies en conditions standardisées évitant de telles interactions. Seules les mesures d'adaptation tirées des cultures de ray-grass destinées à la mesure du phosphore absorbé répondent à une telle exigence.

La référence biologique adoptée dans notre travail est la quantité totale du phosphore prélevé par la plante. Cette référence englobe le phosphore trouvé dans les racines et les collets en fin d'expérience. Le phosphore exporté par les premières coupes d'une culture très dense de ray-grass traduit le flux mobile par la plante et constitue, selon Gachon (1988) une meilleure référence biologique de l'offre potentielle du sol.

3. Matériel utilisé

- Le sol

le sol est apporté de la région de Afane située à 25km sur l'axe Batna-Arris, au niveau de l'embranchement menant dans les trois directions ; Arris-Bouhmar-Thniet El Abed, il a été ramené le 30 juin 2003 de l'horizon 0-30cm, laissé sécher à l'air libre, broyer et tamiser à 2mm, ces caractéristiques physico-chimiques sont montrés dans le tableau I-1

Tableau n°I-1 : caractéristiques physico-chimiques du sol

Calcaire total (%)	1.56	
pH	8.07	
CE (dm\cm ³)	036	
DA(g\cm ³)	1.5	
CR (%)	28.2	
CEC (meq\100g sol)	24	
Na (meq\100g sol)	0.14	
Mg (meq\100g sol)	4.56	
Ca (meq\100g sol)	19.44	
K (meq\100g sol)	1.14	
C org (%)	1.56	
MO (%)	2.44	
N tot (%)	0.175	
C\N	8,11	
K tot (mg\100g)	90	
P tot (ppm)	950	
Pass joret Hebert (ppm)	125	
Pass Olsen (ppm)	85	
Texture	A %	30.92
	LF %	8.63
	LG %	2.93
	SF %	17.04
	SG %	40.47
Classe granulométrique : argilo-sableux		

Il s'agit d'un sol brun calcique, d'une texture argilo-sableuse, c'est un sol lourd a densité apparente de 1.5, non calcaire et non salé. Le pH est basique et (8,07), le complexe adsorbant est saturé, essentiellement en Ca²⁺ (95.3%), ce qui explique le pH élevé malgré la faible réserve en calcaire. La teneur en matière organique est moyenne, le rapport C\N est satisfaisant, le sol est moyennement riche en azote et en carbone, ainsi qu'en phosphore assimilable.

- Le gypse

Le minerai de gypse est apporté à l'état naturel sous forme de cristaux, de la carrière de Ain-Touta de l'usine Houfani au sud de la wilaya de Batna, son analyse a montré qu'il contient 86% de gypse pure.

Le minerai est broyé finement à la taille de sable fin et tamisée pour avoir la poudre présentant la plus meilleure solubilité (FAO, 1990), car c'est l'effet chimique du gypse qui est recherché.

- La plante test

La graminée choisie qui est le ray-grass d'Italie (*Lolium multiflorum*), plante non exigeante pouvant être semée à n'importe quelle période de l'année et supportant plusieurs coupes successive (Gachon, 1988), elle présente une exceptionnelle facilité d'installation, il lui suffit d'une semaine pour lever. Elle est très productive et s'installe facilement. Repousse facilement après coupe, sa réaction aux fumures est forte et rapide (le rendement est proportionnel à la fumure apporté (Gros, 1979)). La faculté germinative des semences de ray-grass est déterminée comme suit : 100 graines sont introduites dans une boîte pétri sur un papier buvard imbibé d'eau et laissé dans l'étuve à 25°, après germination, compter le nombre de graines qui ont germées et calculer le taux de germination, il est de 87%.

- L'engrais phosphaté

L'engrais phosphaté utilisé est le triple superphosphate (TSP) à 46%. Engrais présentant une très bonne solubilité recommandé pour cela pour tous les sols y compris les sols calcaires et gypseux, il est présent sous forme granulée. Le TSP ne contient pas de sulfate de calcium, c'est un engrais à action rapide à cause de sa forte solubilité, convient à toutes les cultures et à tout les sols, il n'agit pas sur le pH, donc il peut être utiliser en sol calcaire et en sols argileux (Diehl, 1975).

- Les pots

Des pots en plastiques d'une capacité de 2kg sont utilisés. Ils sont d'une forme circulaire, à un diamètre de 20cm et une hauteur de 17.6cm. les pots sont perforés à la base pour permettre l'aération.

3.1 Préparation des mélanges sol-gypse

L'essai porte sur un sol sans apport de gypse (SG0) et sur des sols à 20, 40 et 60% de gypse (SG20, SG40 et SG60). Ces pourcentages sont choisis suivants les données bibliographiques qui indiquent qu'à des teneurs inférieures à 25% de gypse a un faible ou pas d'effet sur la fertilité du sol (FAO, 1990). Des teneurs supérieures à 30% peuvent être toxiques pour les plantes, (Van Alphen et Rios Romero, 1971). Pour d'autres, les plantes peuvent supporter des teneurs voisines de 50% (Jafarzadeh et Zinc, 2000).

Il a été choisi d'étudier et de tester l'effet d'une teneur de 5% (SG5) de gypse, qui est une teneur faible dont l'effet favorable sur les caractères physiques a été montré par plusieurs auteurs. FAO (1998) signale qu'un sol n'est dit gypseux que s'il contient plus de 5% de gypse.

Les teneurs choisis sont de 0, 5, 20, 40 et 60%. Pour avoir ces différentes teneurs il faut préparer les mélanges en gardant toujours un poids sol-gypse constant (2kg) et en prenant en considération la teneur de minerai de gypse en gypse pure de 86%.

❖ Exemple de calcul de la teneur en gypse

100g de minerai contient 86% de gypse pur, pour avoir 5% il faut une teneur en gypse de 5.813 calculés comme suit :

$$\begin{array}{ccc} 100\text{g de minerai} & \longrightarrow & 86\text{g de gypse} \\ X & \longrightarrow & 5\text{g} \\ X = 5 \times 100/86 & = & 5.813\text{g de minerai en poudre.} \end{array}$$

Donc ajouter 581,39g de gypse à 418, 61g pour avoir 1kg du mélange ou 1162,78g de gypse à 1883.722g de sol pour avoir 2kg. La même chose pour les autres traitements. Les quantités de gypse et de sol à apporté pour préparer les 5 teneurs du sol en gypse sont présentés dans le tableau I-2.

Tableau I-2 : Préparation des mélanges sol gypse

Traitement	Quantité de sol (g)	Quantité de gypse (g)	Poids total
SG0	2000	0	2kg
SG5	1883.72	116.28	2kg
SG20	1534.89	465.11	2kg
SG40	930.59	1069.6	2kg
SG60	604.65	1395.34	2kg

Il faut bien mélanger le gypse au sol, et déterminé pour ces derniers le pH et la CE, les résultats sont montrés dans le tableau I-3.

Tableau I-3 : Détermination du pH et de la CE

Teneur en gypse	0%	5%	20%	40%	60%
pH	8.07	7.9	7.87	7.71	7.68
CE	0.36	2.22	2.22	2.26	2.32

3.2 Apport d'engrais phosphatés

L'étude porte sur des traitements sans apport d'engrais et sur du traitement avec apport d'une dose de 250ppm et d'autres avec une dose double de 500ppm.

L'engrais utilisé est le TSP à 46%, les quantités ajoutées à chaque traitement sont calculées comme suit :

❖ Pour avoir 250ppm

$$\begin{aligned} 100\text{g TSP} &\rightarrow 46\text{g de P}_2\text{O}_5 \\ X &\rightarrow 250\text{g} \\ X &= 0.534\text{g} \end{aligned}$$

Apporter 0.534g de TSP pour 1kg de sol et pour 2kg apporter 1.068g de TSP

❖ Pour avoir 500ppm

$$\begin{aligned} 100\text{g TSP} &\rightarrow 46\text{g de P}_2\text{O}_5 \\ X &\rightarrow 500\text{g} \\ X &= 1.068\text{g} \end{aligned}$$

Apporter 1.068g de TSP pour 1kg de sol et pour 2kg apporter 2.136g de TSP

L'engrais est bien mélangé aux différents traitements après être broyé finement sous forme poudreuse pour avoir un meilleur effet (Quemener , 1968) et pouvoir le mélanger d'une façon homogène au sol.

Une analyse du phosphore assimilable (joret-hebert et du phosphore Olsen) des différents traitements après apport de gypse est réalisée, et déterminé les teneurs en cet élément des traitements sans engrais, les teneurs des différents traitements sont résumées dans les tableaux suivants :

Tableau I-4 : Teneurs initiales en phosphore assimilable joret hebet en ppm

	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
D0	125	119.1	94.01	64	39
D1(D0+250ppm)	375	369.1	344.01	314	289
D2(D0+500ppm)	625	619.1	594.01	564	539

Tableau I-5 : Teneurs initiales en phosphore assimilable Olsen en ppm

	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
D0	85	90.01	64.32	49.05	16.99
D1(D0+250ppm)	335	330.01	314.32	299.01	266.99
D2(D0+500ppm)	585	580.01	564.32	549.01	516.99

3.3 Dispositif expérimental

Le dispositif adopté est celui de randomisation totale, l'essai porte sur 15 traitements répétés 4 fois. Pour chaque sol à teneur défini en gypse (sans gypse ou avec gypse). 3 pots sont préparés (répétés 4fois), apporter à un pot la D1 d'engrais, à l'autre la D2 et le troisième est laissé sans apport d'engrais (D0), comme il est montré dans le tableau suivant :

Tableau I-6 : Dispositif expérimental

Traitement	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
D0	SG0D0	SG5D0	SG20D0	SG40D0	SG60D0
D1	SG0D1	SG5D1	SG20D1	SG40D1	SG60D1
D2	SG0D2	SG5D2	SG20D2	SG40D2	SG60D2

Avec : **S** = sol,

G = gypse (0, 5, 20, 40 et 60 désignent respectivement les teneur 0, 5, 20, 40 et 60% de gypse)

D = dose d'engrais (D0 désigne le non apport d'engrais, D1 et D2 désignent respectivement l'apporte de 250 et 500ppm d'engrais).

Exemple : **SG5D0** désigne sol à 5% de gypse et sans apport d'engrais

3.4 Conduite de l'essai

La plante doit être mise dans les meilleures conditions de développement, afin de déceler l'effet seul du phosphore.

3.4.1 Préparation des pots

Les pots sont perforés à la base, tapissés par une couche de 3cm de sable grossier sur laquelle apporter les différents mélanges pour éviter le contact direct du sol avec le sol (Gachon et Triboi, 1988)

3.4.2 Semis

Dans chaque pot 2g de ray-grass sont enfuis manuellement aussi régulièrement possible, pour avoir une biomasse suffisante à chaque coupe, d'un côté pour permettre d'effectuer les analyses et d'un autre côté pour assurer une bonne colonisation du sol par la plante (Gachon et Triboi, 1988). Le semis est réalisé à 2 cm de profondeur. Enfin, bien couvrir les semences et tasser le sol afin d'avoir le meilleur contact sol-semence.

3.4.3 Irrigation

Les pots sont irrigués par des apports quotidiens d'eau, les quantités à apporter sont déterminées de la façon suivante :

Avant le semis, les pots sont humectés et saturés en eau puis laissés se ressuyer pendant 24h, et sont pesés les poids sont notés.

Les pots sont pesés quotidiennement, et rajouter à chaque fois la différence de poids en eau entre la pesée après ressuyage et la nouvelle pesée.

Encore, irriguer les pots à $\frac{2}{3}$ de la capacité de rétention, qui a été déterminée préalablement pour les différents traitements, cette humidité est maintenue constante pendant toute la durée d'essai par des apports quotidiens d'eau.

Pour le sol sans apport de gypse la capacité de rétention est déterminée par la méthode classique de Bouyougos, elle est exprimée en pourcentage du poids d'eau retenue par rapport à la terre séchée à 105° .

$$\mathbf{CR = Ph - Psec \setminus PSEC. 100}$$

CR = capacité de rétention

Ph = poids du sol humide

Psec = poids du sol séché à 105°

Pour les sols à différents teneurs en gypse, la capacité de rétention est déterminée par la méthode définie par Pouget (1968) qui détermine la capacité de rétention à 105° et tranche du résultat le 1/5 de la teneur du sol en gypse (le gypse est hydraté et se déshydrate après séchage se qui surestime la teneur en eau de ces sols)

$$\text{CR des sols gypseux} = \text{CR à } 105^\circ - 1/5 \text{ teneur en gypse}$$

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau I-7 : Capacité de rétention en eau des différents traitements

Traitement	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
CR %	28.2	25.31	27.45	22.01	16.35

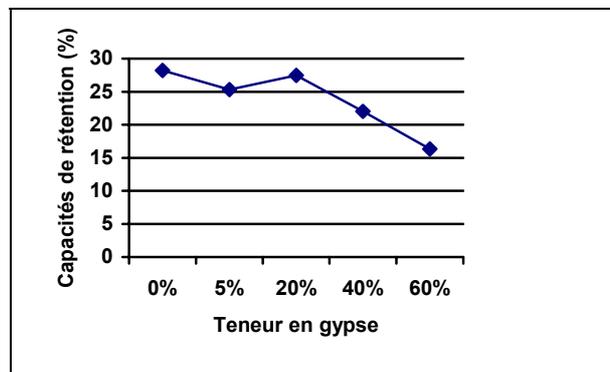


Figure I-1 : Capacité de rétention en eau en fonction de la teneur en gypse

Les pots sont irrigués à 2/3 de la capacité de rétention, les quantités à apporter sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau I-8: Quantité d'eau à apporter à chaque traitement

Traitement	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
Pour 1kg de sol (g)	188	168.37	183	146.72	109
Pour 2kg de sol (g)	976	336.34	366	293.44	218
Poids sol-eau à garder Constant (g)	2376	2336.34	2366	2293.44	2218

Les traitements sont pesés quotidiennement et irrigués tout au long de l'expérimentation.

3.4.4 Fertilisation

Les deux azote et potassium sont apportés au début, à tous les traitements, à raison de 80ppm d'azote sous forme d'urée, et 60ppm de potassium sous forme du chlorure de potassium.

3.5 Conditions de l'essai

L'essai est réalisé au laboratoire à une température de 22 à 25°C. Les pots sont bien exposés à la lumière. Ils font sujet à des rotations quotidiennes de telle manière qu'ils reçoivent la lumière d'une façon homogène.

3.6 Durée de l'essai

L'essai a duré 51 jours

3.7 Prélèvement des échantillons de sol et coupes végétales

Les prélèvements du sol et du végétal sont réalisés simultanément après 21 jours, 36 et 51 jours du semis (à 21, 15 et 15 jours d'intervalle).

❖ Prélèvement du végétal

Les coupes 1 et 2 sont réalisées à 3cm du sol. A la fin récolter la partie aérienne et les racines, ces derniers sont bien lavés pour éliminer la terre et essuyer.

❖ Prélèvement des échantillons de sols

Les échantillons sont prélevés des différent point du pot à 10cm de profondeur et laisser séché à l'air libre. Ils sont broyés et tamisés, les teneurs en phosphore assimilable sont déterminés par les deux méthodes : Joret-hebert et Olsen

4 Mesures à effectuer

❖ Pour le sol

- Le pouvoir fixateur des différents traitements sans apport d'engrais est réalisé par les deux méthodes choisies.

- Les teneurs en phosphore assimilable Joret-hebert et Olsen à 21, 36 et 51 jours, sont déterminées, ce qui permet de montrer l'effet du gypse, de l'engrais et du temps sur la teneur des différents traitements en cet élément.

❖ Pour le végétal

Après chaque coupe, déterminer:

- La matière sèche par séchage à l'étuve à 80° pendant 24 heures et peser.

- Le phosphore total par rapport à la matière sèche
- Le phosphore absorbé par le produit de la matière sèche et de la teneur en phosphore en pourcent de la matière sèche.
- La croissance totale (obtenue par les trois coupes)
- L'absorption total du phosphore (obtenue par les trois coupes)

Pour la partie racinaire déterminer la matière sèche, la longueur et la teneur en phosphore par rapport à la matière sèche produite et la quantité de P cumulées dans les racines.

A partir de ces données les deux paramètres suivant peuvent être calculés :

- Les taux de croissances qui sont déterminés à chaque coupe par la croissance à chaque coupe rapportée à la croissance totale comme suit :

$$\mathbf{Tacc = Crx \ / \ Crt \ x \ 100}$$

Tacc = taux d'accroissement

Cr_x = croissance à la coupe x (x : coupe 1, 2 ou 3)

Crt = croissance totale (croissance coupe 1 + coupe 2 + coupe 3)

- Les taux de prélèvement : il sont déterminé comme suit

$$\mathbf{Tpr = Px \ / \ Ptot \ .100}$$

Tpr = taux de prélèvement

P_x = prélèvement à coupe x, x = coupe 1, 2 ou 3

Ptot = prélèvement total en mg\j\pot du ray-grass pour les différents traitements

- Le gain de croissance due à l'apport de l'engrais: Il est déterminé par différence entre être la matière sèche produite à apport d'engrais (D1 et D2) et la matière sèche produite sans apport (pour un sol à même teneur en gypse) comme suit :
-

$$\text{Gcr} = \text{MSD}_x - \text{MSD}_0$$

Gcr : gain de croissance (de matière sèche) en (g)

MSD_x : croissance à apport d'engrais D, x : dose d'engrais (D1 ou D2) ;

on détermine les taux des gains de croissance :

$$\text{G cr (\%)} = \frac{\text{MSD}_x - \text{MSD}_0}{\text{MSD}_x} \cdot 100$$

- Le degré de corrélation entre les quantités du phosphore absorbé par la plante et les deux méthodes d'extraction du phosphore assimilable.

5. Méthode d'analyse

5.1 Détermination du pouvoir fixateur

a Méthode d'extraction à CaCl₂

Il s'agit de mettre en équilibre le sol avec une solution de CaCl₂ (0.01M), en agitant pendant 1 heure (Gachon, 1972), de filtrer et doser par la même méthode que celle de Joret-hebert. Calculer la quantité du phosphore que le sol peut retenir par différence entre la donnée précédente et la concentration maximale de 2mg/l.

b Méthode de BLAKEMORE

Cité par « processus for soil analysis » (Anonyme, 1995).

➤ Réactifs

Solution de P-rétention 1000mg/l :

Dissoudre 5.5g de KH₂PO₄ et 32.5g d'acétate de sodium anhydre dans 1l d'eau distillée, ajouter 23ml d'acide nitrique, apporter le volume à 2l. Le pH doit être de 4.6-+0.01

L'acide vanadomolybdique :

-Diluer 100ml d'acide nitrique dans 1l d'eau distillée

-Dissoudre 0.8g de vanadate d'ammonium dans 500ml d'eau bouillante, après refroidissement, ajouter 6ml d'acide nitrique dilué à 1l en ajoutant de l'eau distillée.

-après ajout de l'acide nitrique à la solution de vanadate, ajouter le molybdate, et mélanger.

➤ **Préparation de la gamme étalon**

-De la solution de P- rétention (1000mg/l), pipeter 0, 10, 20,30, 40 et 50ml dans des tubes à essai, compléter avec l'eau distillée jusqu' à avoir le volume de 25ml pour tout les tubes. Ces solutions correspondent à une rétention de 10, 80, 60, 40, et 0% respectivement :

Tableau I-9: rétention en P des différents traitements

Solution de rétention en P (ml)	0	10	20	30	40	50
Eau distillée (ml)	50	40	30	20	10	0
Rétention en %	10	80	60	40	20	0

➤ **Procédure**

-Peser 5g de sol, ajouter 25ml de solution de P-rétention. Centrifuger à 2000tours\mn pendant 15mn.

-Ajouter 19ml de l'acide vanadomolybdique nitrique dans des tubes de 30ml, ajouter 1ml du produit surnageant ainsi que des solution de la gamme étalon.*

➤ **Calcule**

Après lectures, établir la courbe de P-rétention (figure I-2) des solutions de la gamme à partir des résultats suivants :

Tableau I-10 : lecture des rétentions en P des différents traitements

Rétention en P en %	100	80	60	40	20	0
Lecture	0.02	0.22	0.51	0.75	0.96	1.07

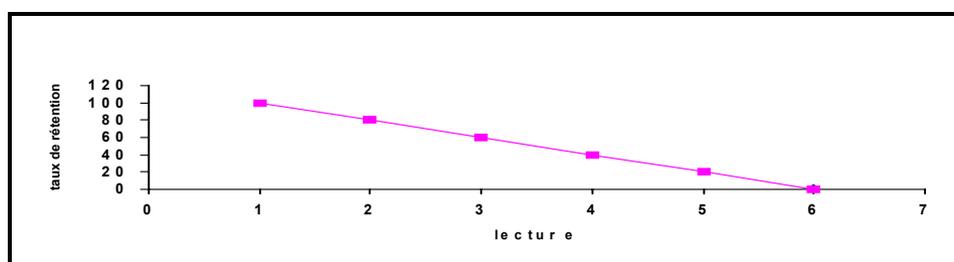


Figure I-2 : Coure de rétention en P

Après 30mn, lire sur colorimétrie à la longueur d'onde de 450nm. Les valeurs lues sur le

spectrophotomètre sont projetées sur le graphe déjà établie pour déterminer la quantité de phosphore retenue en %, ou en utilisant la fonction prévision du programme *Excel* après introduction des données de la gamme étalon.

5.2 Dynamique du phosphore

5.2.1 Analyse du phosphore assimilable Joret-Hebert

Il s'agit de faire une extraction à l'oxalate d'ammonium à 0.2N, le dosage s'effectue à l'acide ascorbique 0.1% et le réactif sulfomolibdique.

- **Produit extractif** : oxalate d'ammonium (0.2N)
- **Produits de dosage** : acide ascorbique (0.1%), réactif sulfomolibdique (10N), solution de KH_2PO_4 pour la préparation de la gamme étalon.

5.2.2 Analyse du phosphore assimilable Olsen

Il s'agit d'une extraction au bicarbonate de sodium 0.5N et doser par le molybdate d'ammonium et le chlorure d'étains.

- **Produit extractif** : Bicarbonate de sodium (0.5N)
- **Produit de dosage** : Molybdate d'ammonium, Chlorure d'étains (ajouter à 5g de SnCl_2 2.5ml d'HCl, prélever 1ml auquel ajouté 33ml d'eau distillée)

5.3 Détermination du phosphore total contenu dans la plante

On le détermine par la méthode de AUDIGE (1978) :

- Peser 0.4g du végétal (partie aérienne ou racinaire)
- Incinérer au four à 500°C pendant 5 heures et ajouter 5 ml d'HCl à 20% de concentration.
- Doser le phosphore de la même manière que pour la méthode Joret-hebert

5.4 Autres analyses effectuées

- La granulométrie est déterminée par la méthode pipette Robinson,
- Le calcaire total par le calcimètre de Bernard,
- La matière organique par la méthode anne,
- Le pH par pHmètre avec le rapport 1\2.5,
- La CE par conductimètre avec rapport 1\2.5,

- La densité apparente par la méthode du cylindre.,
- La CEC par la méthode Nelson (à l'acétate d'ammonium),
- Les bases échangeables par la méthode Nelson Ca et Mg par absorption atomique, Na et K par photomètre à flamme
- L'azote total par la méthode Kjeldal.
- Le carbone organique par la méthode anne.
- Le phosphore total par attaque triacide ainsi que le K total,
- Le phosphore assimilable par deux méthodes (Joret-Hebert et Olsen),

6 Méthode statistique

Les résultats obtenus ont fait objet à une analyse de la variance, les différentes corrélations sont calculées (à 5%). ainsi que les coefficients de corrélation, et des comparaisons des deux de détermination du pouvoir fixateur en phosphore et des deux méthodes d'analyse du phosphore assimilable par le logiciel *statitgraphic*.

1. Influence du gypse sur la dynamique
du phosphore dans le sol

Chapitre II Résultats et discussion

1. Influence de gypse sur le dynamique du phosphore dans le sol

1.1 Influence de gypse sur le pouvoir fixateur en phosphore du sol

a. Méthode d'extraction au CaCl_2

La méthode d'extraction au CaCl_2 permet de donner la concentration de la solution du sol en phosphore en mg/l. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau II-1.

Tableau II-1 : Pouvoir fixateur des différents traitements en phosphore (Par extraction à CaCl_2)

Traitement	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
Concentration en P de la solution du sol en mg/l.	0.2	0.19	0.12	0.07	0.03
Quantités de P à apporter en ppm pour avoir la concentration de 2mg/l.	1125	1134.25	1472.82	1764.57	2561

Ces résultats révèlent que tous les traitements fixent le phosphore, y compris le sol témoin. En effet, le pouvoir fixateur est élevé pour SG0, qui a un pH basique et un taux de saturation élevé en Ca^{2+} , ce qui conduit à la fixation de P, il peut retenir 1125ppm. Le pouvoir fixateur augmente en fonction de la teneur en gypse pour atteindre 2561ppm pour SG60, cette valeur très élevée, et due à la présence des ions Ca^{2+} en surplus qui fixent le phosphore, ce qui est confirmé par Pierzensky et al (2000). Le pouvoir fixateur en phosphore du sol et la teneur en gypse sont fortement corrélés avec $r = 0,98^*$ (à 5%).

b. Méthode BLAKEMORE

Les résultats obtenus par cette méthode sont résumés dans le tableau II-2.

Tableau II-2 : Pouvoir fixateur des différents traitements en phosphore (Méthode BLAKEMORE)

Traitement	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
Lecture	0.83	0.82	0.34	0.03	0.02
Quantité retenue de P (%)	42	51.5	72.2	89.3	97.97

Le sol témoin SG0 a retenu 42% du P (après apport de 1000mg de P), cette rétention augmente en fonction de la teneur en gypse, elle est de 97.97% pour SG60. Le coefficient de corrélation liant la rétention en P à la teneur en gypse est significatif avec $r = 0.97^*$ (à 5%).

Le deux méthodes d'analyses ont donné des résultats d'une allure similaire du pouvoir fixateur en présence d'un gradient croissant de gypse. En effet, La comparaison des résultats des deux méthodes montre que le pouvoir fixateur évolue de la même manière ce qui est montré par la figure suivante :

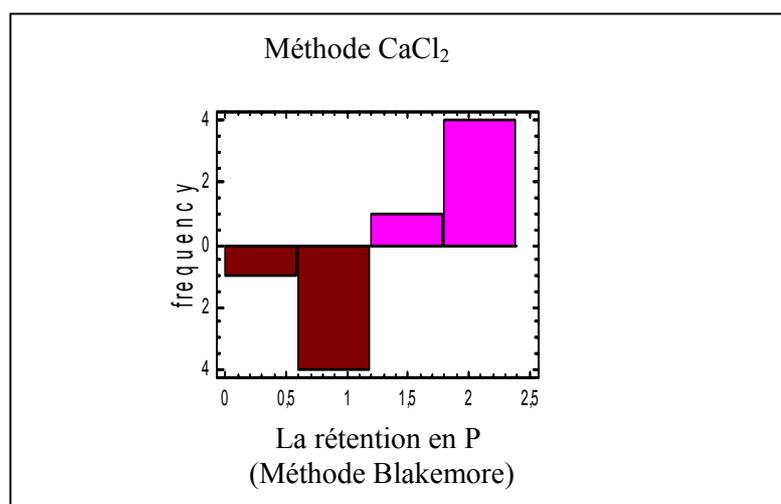


Figure II-1 : Comparaison de l'évolution des résultats de la méthode CaCl_2 et de la méthode Blakemore

Les résultats obtenus par les deux méthodes montrent que tous les traitements ont un pouvoir fixateur vis à vis du phosphore, même pour le sol sans apport de gypse, mais ce pouvoir fixateur augmente graduellement avec la teneur en gypse. En effet, le sol témoin présente un taux de saturation élevé (95,3%), le complexe adsorbant est saturé par les cations Ca^{2+} qui provoquent la fixation du phosphore. Aussi, ce sol est d'une texture argilo-sableuse, donc à teneurs

considérables en argile qui fixe le phosphore. Toutefois, Les travaux de Brossard et Laurent (1992) ont révélé que les sols à teneurs importantes en argile ont un pouvoir fixateur élevé vis à vis de cet élément. Lemercier et al (2003) ont montré que la capacité du sol à stocker le phosphore est élevée en sols argileux. Cependant, Gachon et Triboi (1988) signalent qu'un sol argilo-calcaire à pouvoir fixateur élevé vis à vis du phosphore, peut fixer 2200ppm de cet élément.

Le phosphore est dispersée dans la matrice du sol, essentiellement les argiles, les phénomènes d'adsorption et de désorption présentent une cinétique rapide par rapport aux réactions de précipitation et de dissolution, pour cette raison les phénomènes d'adsorption désorption contrôlent la concentration du phosphore dans la solution du sol et par conséquent sa mobilité et sa biodisponibilité (Vanden Bossche, 1999), ces réactions surviennent lorsque les conditions du milieu sont favorables (pH basique par exemple) de notre sol.

L'adsorption du phosphore par les Ca^{2+} est rapide, elle est suivit par l'évolution en forme de moins en moins stable et à sa précipitation par conséquence, mais ces réactions sont plus lentes que les premières.

Après l'apport de 1000mg de P qui est très réactif avec le sol, les phénomènes d'adsorption, de fixation et de précipitation surviennent, les argiles fixent le phosphore par l'intermédiaire des cations adsorbés à leurs surfaces (Giroux et al, 1996 in Compaoré, 2001), la rétention du phosphore se fait par *sédimentation*, *adsorption* et processus d'*échange* entre le sol et la solution du sol.

Il y a aura forte rétention du phosphore apporté au sol, ce qui a été montré par Fardeau (1993a) qui révèle que suite à l'apport de quantité supérieure à celle autorisée par la valeur limite d'équilibre, les ions phosphatés sont adsorbés puis intégrés dans les structures minérales processus nommé pouvoir fixateur, ce phénomène fait décroître la concentration des ions phosphatés dans la solution du sol et abaisse le potentiel chimique de ces ions et donc le pouvoir alimentaire.

Le pouvoir fixateur augmente au fur et à mesure que la teneur en gypse est élevée. Ce ci est due à la réaction du phosphore avec le Ca^{2+} apporté par le gypse, étant donnée la faible solubilité de gypse dans l'eau, il est suggéré que le phosphore s'adsorbe surtout sur la surface de

gypse par des réactions de nucléation et de précipitation. La sorption du phosphore par le gypse est confirmée par et Panahi Kordlaghari (1997) et Panahi Kordlaghari et Rowell (2006).

1.2 Influence de gypse sur la dynamique du phosphore:

L'effet de gypse sur l'évolution du phosphore assimilable extrait par la méthode Joret-Hebert (P_{jh}) et du phosphore extrait par la méthode Olsen (P_{ols}), a été étudié après apport des différentes doses d'engrais et au cours du temps.

Le phosphore assimilable été déterminé pour les différents traitements après 21, 36 et 51 jours par les deux méthodes Joret-Hebert et Olsen. pour les traitements ayant subi des apports de gypse le phosphore assimilable est déterminé en transformant toutes les valeurs obtenues à la même quantité de sol (1000mg de sol), comme il est montré par l'exemple suivant :

Pour SG60D0 à 21jours ; il présente la teneur de 17ppm de P_{jh}

$$\begin{array}{l} 17\text{ppm} \rightarrow 302.32\text{g de sol} + 697.68\text{g gypse (sol+gypse=1000g)} \\ x \rightarrow 1000\text{g de sol} \end{array}$$

$$x = 1000 \times 17/302.32$$

$$x = 56.32\text{ppm.}$$

Les tableaux 1 et 2 en annexe résument les résultats obtenus (Les quantités prélevées par la plante sont pris en considération).

Aussi ces résultats ne permettent pas de faire ressortir l'effet de gypse seul car le sol témoin sans gypse présente un pouvoir fixateur vis à vis du phosphore. Ce ci est défini par différence entre les résultats des teneurs en phosphore assimilable du sol témoin sans gypse et du sol avec gypse (à même dose d'engrais).

L'effet de gypse sur les teneurs en phosphore assimilable est étudié comme suit :

1-2-1 Evolution du phosphore assimilable joret-Hebert et du phosphore assimilable Olsen

1.2.1.1 Evolution de phosphore assimilable sans apport d'engrais

D'une façon générale, les valeurs du phosphore assimilable diminuent graduellement avec la teneur en gypse, ce qui est montré par les figures II-2, et diminuent en fonction du temps.

Après 21 jours, le traitement à 60% de gypse a présenté 10.07ppm de Pjh et une valeur nulle de Pols. Après 36 jours, ce traitement ne contient plus de phosphore assimilable. Le traitement à 40% de gypse présente aussi une teneur nulle en Pols, et une faible teneur en Pjh de 14.75ppm. à l'issu du troisième prélèvement du sol réalisé à 51 jours, les résultats évoluent de la même manière et sont comme suit :

Traitement	Teneur en Pjh	Teneur en Pols
• SG0D0	81ppm	52ppm
• SG5D0	59.41ppm	41.93ppm
• SG20D0	16.98ppm	8.61ppm
• SG40D0	6.68ppm	0ppm
• SG60D0	0ppm	0ppm

La figure II-2 montre la diminution du phosphore Joret -Hebert et du phosphore Olsen en fonction de la teneur en gypse et du temps pour les traitements sans engrais.

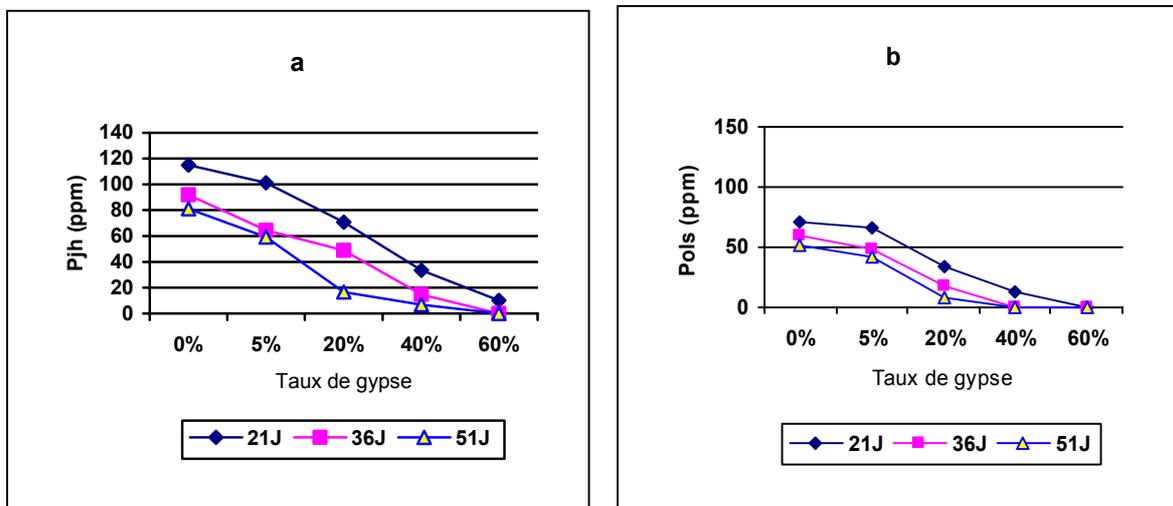
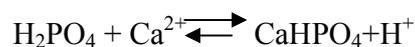


Figure II-2 : Evolution de la teneur en phosphore assimilable en fonction du taux de gypse et du temps pour les traitements sans apport d'engrais
-a-phosphore joret -Hebert -b-Phosphore Olsen

La diminution des quantités du phosphore assimilable a été notée pour tous les traitements même pour le sol témoin (sans gypse et sans apport d'engrais). En effet, le phosphore a probablement

réagit avec les Ca^{2+} présents, d'où il y a formation de composés P-Ca insolubles, cette réaction a été réalisée et favorisée par les conditions d'humidité, en effet le sol a été maintenu à 2/3 de sa capacité de rétention tout au long de l'essai, Snyder et Staton (2002) ont montré qu'après irrigation d'un sol basique présentant une concentration élevée en Ca^{2+} , la plupart du phosphore se transforme en phosphates calciques insolubles, ce qui diminue la biodisponibilité de cet élément. Beaucoup d'auteurs ont montré que tous les sols fixent le phosphore. En effet, tous les sols ont un pouvoir fixateur vis à vis de cet élément (Morel (1996) ; Vilain (1997) ; Fardeau, (1993) ; Gachon (1988), ce pouvoir varie d'un sol à un autre, et dépend de plusieurs facteurs (pH, des cations présents, de la teneur et du type de l'argile présente, ...). L'expérimentation a été portée sur un sol à pH 8.07, à complexe adsorbant saturé (à 95.3 %), ces conditions sont très favorables à la rétention du phosphore par le sol. Toutefois, Shrarplay et al (1988) ont montré que le phosphore est influencé par la nature des cations échangeables, lorsque Ca^{2+} est le cation dominant la solubilité de cet élément est très affectée. Dans les sols non calcaires, Lorsque le complexe adsorbant est saturé en Ca^{2+} il y a formation du phosphore insoluble par réaction des phosphates avec le Ca^{2+} du complexe adsorbant, la réaction du Ca^{2+} avec H_2PO_4 produit des H^+ :



Ces H^+ peuvent modifier le pH, mais grâce au pouvoir tampon du sol, ils sont fixés sur le complexe adsorbant et le pH ne change pas (Cho, 1991). La diminution de la teneur en phosphore assimilable est due à la formation de phosphates insolubles. Ce qui est prouvé par Cho (1991) ; Akinrami et Cho (1991), Bell et Black (1970), c'est que le phosphate formé par réaction avec le Ca^{2+} évolue en forme de moins en moins soluble.

Il est à noter que la quantité du phosphore assimilable diminue graduellement avec la teneur en gypse. Les taux élevés de diminution de ces teneurs montrent qu'il y a une perte de solubilité et un changement de la forme du phosphore dans le sol. Cette perte de solubilité peut s'expliquer par l'insolubilisation du phosphore qui est de plus en plus importante que le taux de gypse est élevé. Ce ci peut s'expliquer par la précipitation du phosphore sous forme de phosphate calcique en réagissant avec les cations Ca^{2+} provenant de gypse. Panahi Kordlaghari (1997) affirme que quelque soit la source des Ca^{2+} (gypse ou calcite), ce dernier fixe les ions

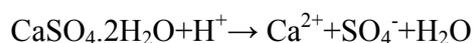
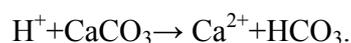
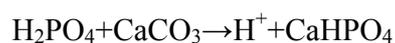
phosphates à condition que le pH soit élevé, condition de notre sol. Dans les sols calcaires, riches en Ca^{2+} , la forme dominante du phosphore est celle du P-Ca (phosphate lié au calcium) (McKenzie et al, 2003), caractérisés par une faible labilité (Gachon, 1988 ; Halvin et Wetsfalle, 1993). Le sol, en présence de gypse, est encore plus riche en cations Ca^{2+} , vu la solubilité de ce minéral, qui est plus importante que celle du calcaire. L'insolubilisation du phosphore est accentuée.

Le phosphore peut être insolubilisé par trois voies :

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

Ceci est indiqué par Akinrami et Cho (1991), en travaillant sur l'insolubilisation du phosphore en présence de la calcite. Ils montrent que le phosphore réagit d'abord avec le Ca^{2+} du complexe adsorbant, puis avec le Ca^{2+} libre de la solution du sol, ensuite avec le Ca^{2+} présent sur la surface de la calcite et de ce fait sur la surface de gypse.

Après réaction de H_2PO_4 avec la Ca^{2+} du complexe adsorbant il y a formation des H^+ , qui vont attaquer le CaCO_3 ou le $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ pour notre cas, pour libérer encore des Ca^{2+} , ces derniers réagissent avec le phosphore, les protons H^+ formés ne vont pas altérer le pH.



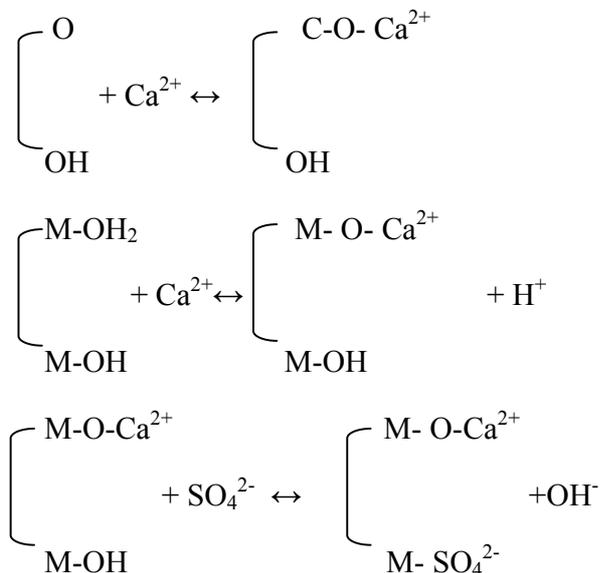
Après l'apport de gypse, le pH reste toujours favorable à l'insolubilisation du phosphore, il est supérieur à 7.6, ce qui a été prouvé par Bell et Black in Halvin et Wetsfalle (1984).

Une diminution légère du pH en fonction de la teneur en gypse été notée. Elle est due à la formation de l'acide sulfurique qui est un acide fort après dissolution de gypse dans la solution du sol, le pH n'est pas fortement changé vu le pouvoir tampon du sol et le taux de saturation élevé du complexe adsorbant en ion Ca^{2+} .

Dans les sols calcaire, le pH reste inchangé, les H^+ formés réagissent avec le $CaCO_3$, et il y a formation de l'acide carbonique qui est un acide faible. Dans le cas de la présence de gypse dans le sol, il y a après solubilisation de ce dernier un enrichissement de la solution du sol en ions Ca^{2+} et SO_4^- , les sulfates peuvent former un acide fort (H_2SO_4), mais ces derniers peuvent réagir avec les ions K^+ , Mg^{2+} , ... etc. Pour former des sels : K_2SO_4 , $MgSO_4$, ... etc. Selon Bolan et al (1993), l'augmentation du taux de saturation du complexe adsorbant en ions Ca^{2+} conduit à l'augmentation des charges positifs, par conséquent une augmentation de l'adsorption des ions SO_4^{2-} , et $H_2PO_4^-$. L'adsorption des SO_4^{2-} conduit à la formation du $CaSO_4$.

L'augmentation de la rétention des SO_4^{2-} , et $H_2PO_4^-$ en présence de taux élevé de Ca^{2+} est due aux réaction de précipitation qui se produisent à des pH supérieur à 7 (Adams et Rawajfif, (1977) ; Freeman et Rowell (1981)).

En apportant le gypse au sol les ions Ca^{2+} sont libérés, et vont saturer le complexe adsorbant en échange des ions H^+ , et suite à l'adsorption des SO_4^{2-} , les OH^- sont libérés, ce ci conduit à un équilibre avec les H^+ formés, le pH n'est que faiblement altéré :



Le pH reste toujours une condition essentielle pour l'insolubilisation du phosphore, il est

supérieur à 7.6. Panahi Kordlaghari (1997) signale que si le pH du sol est entre 4.8 et 5.5 la capacité d'adsorption du phosphore en présence de gypse est faible, elle augmente lorsque le pH s'élève de 6.5 à 9.5.

Les travaux de Jea Hshwanshen et Barber (1990) révèlent que suite aux réactions de la précipitation des phosphates dans le sol, la quantité des ions $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$ diminue par rapport à celle des HPO_4^- .

L'insolubilisation du phosphore est due à la formation du complexe P-Ca. Selon Esilaba et al (1992), le Ca^{2+} forme un nombre de minéraux phosphatés de solubilité décroissante dans l'ordre $(\text{CaH}_2(\text{PO}_4)\cdot\text{H}_2\text{O})$ (phosphate monocalcique) $> \text{CaHPO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (phosphate dicalcique) $> \text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6$ (phosphate octacalcique) $> \beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_3$ (phosphate tricalcique) $> \text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$ (fluorapatite). Les produits formés au début sont métastables, puis évoluent dans le temps en produit de moins en moins soluble. Gachon (1988) signale que le degré de labilité du phosphate calcique formé en sols calcaires ne dépasse pas 13%.

L'insolubilisation du phosphore est plus importante en présence de gypse qu'en présence du calcaire. Le gypse par sa solubilité qui est plus élevée que celle du calcaire ; fournit au sol de plus grandes quantités de Ca^{2+} actives (FAO, 1990 ; Mashali, 1996 ; Jadarzadeh et Zinck, 2000). Le gypse va enrichir le complexe adsorbant d'abord en ions Ca^{2+} ensuite la solution du sol (Bolt in Loyer, 1991). Les Ca^{2+} réagissent avec le phosphore et forment des phosphates calciques. Plus le sol est riche en Ca^{2+} , plus le phosphore est bloqué. La présence des Ca^{2+} en grandes quantités dans la solution du sol entraîne obligatoirement sa fixation par le complexe d'échange cationique. Dans les sols gypseux, le changement de la composition de la solution du sol influe sur la dynamique du phosphore, ce ci est confirmé par Datago et al (2002). et Selon Louer (1991) la composition cationique de sols calcaires et gypseux caractérisés par la dominance des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} sur Na^+ et K^+ , la composition ionique est comprise entre les limites $1 < \text{Ca} + \text{Mg}$, $1 < \text{Ca} + \text{Mg} / \text{Na} + \text{K}$ et $\text{Ca} / \text{Mg} \geq 1$

Cette étude montre que plus l'on apporte de gypse au sol, plus il y a insolubilisation du phosphore. Ce même résultat a été obtenu en comparant la dynamique du phosphore dans un sol à 5% de gypse et un sol à 40% de gypse (FAO, 1990).

Ainsi, suite à la réaction du phosphore avec le gypse, il y a formation du complexe insoluble P-Ca, qui a été prouvée par une étude réalisée par Muhammed et Jones (1992) concernant les formes du phosphore dans les sols gypseux de l'Iraq et de l'Espagne. Ils ont adopté la méthode de fractionnement et sont arrivés que la fraction du P-Ca forme 69 à 78.6% du phosphore total, étant la plus dominante dans tous les sols étudié, et par Panahi Kordlaghari (1997) qui a identifié les produits de la réaction du phosphore avec le gypse et a analysé par diffractométrie aux rayons X. les produits précipités de la réaction d'une solution de sulfate de calcium avec une solution de phosphate à un pH de 6.7-7. il a noté la production de traces de phosphate dicalcique dihydrate. La composition de la solution a été comparée à celle du diagramme de solubilité des minéraux phosphatés calcique, et indique un équilibre avec le phosphate octacalcique. Cette réaction déplace la plupart du phosphate de la solution du sol qui est précipité en pH élevé et en présence de Ca^{2+} .

1.2.1.2 Evolution du phosphore assimilable avec apport d'engrais

1.2.1.2.1 Evolution du phosphore assimilable avec apport de D1

Les teneur en P_{jh} et P_{ols} des différents traitements sont supérieures à celles des traitements sans apport d'engrais, mais diminuent toujours en fonction de la teneur en gypse et du temps (figures II- 3). En effet, après 21 jours, le traitement SG60D1 a montré une teneur de 79.37ppm de P_{jh} et 43.7ppm de P_{ols}. La diminution des teneurs en phosphore assimilable se poursuit à 36 jours, le SG60D1 présente les teneurs de 46.68ppm de P_{jh} et 21.83ppm de P_{ols}. A 51 jours, les résultats diminuent encore en fonction du temps, mais cette fois ci, le traitement à faible teneur en gypse (SG5D1), présente des résultats en peu plus élevé que celui du sol témoin SG0D1. Les teneurs en phosphore assimilable diminuent encore avec les teneurs moyennes en gypse et encore plus avec les teneurs les plus élevées. Par ordre de décroissance ces teneurs sont

Traitement	Teneur en P _{jh}	Teneur en P _{ols}
• SG0D1	114ppm	99ppm
• SG5D1	119.97ppm	105.11ppm
• SG20D1	75.34ppm	43.05ppm
• SG40D1	36.37ppm	25.24ppm
• SG60D1	29.83ppm	0ppm.

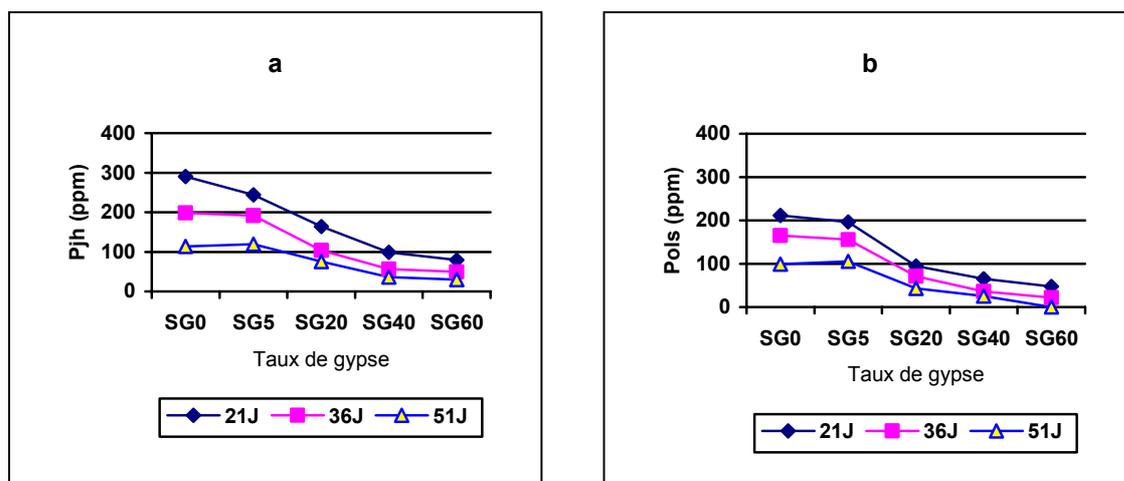


Figure II-3: Evolution de la teneur en phosphore assimilable en fonction de la teneur en gypse et du temps pour les traitements avec apport de D1 d'engrais

-a- phosphore joret hebert -b- phosphore Olsen

1.2.1.2.2 Evolution du phosphore assimilable avec apport de D2

La figure II-4 ; montre que les teneurs en Pjh et Pols sont beaucoup plus élevées que celles des traitements sans apports ou avec apport de D1, mais évoluent de la même manière. En effet, après 21 jours, le SG0D2 présente les meilleurs teneurs en Pjh et Pols, les valeurs obtenues diminuent graduellement avec l'augmentation de la teneur en gypse. Après 36 jours, c'est le SG5D2 qui présentent les résultats les plus élevés. A 51 jours, les résultats diminuent en fonction du temps, mais évoluent de la même manière qu'à 36 jours vis à vis de la teneur en gypse, les teneurs en phosphore assimilable sont comme suit :

Traitement	Teneur en Pjh	Teneur en Pols
• SG0D2	235ppm	168ppm
• SG5D2	248.91ppm	191.11ppm
• SG20D2	130.03ppm	83.5ppm
• SG40D2	60.33ppm	50.10ppm
• SG60D2	49.35ppm	0ppm

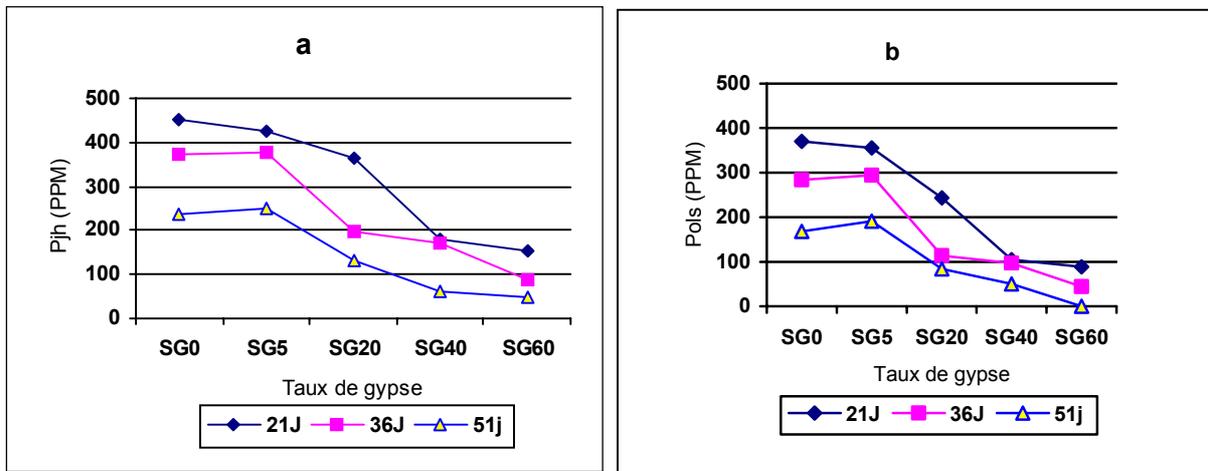


Figure II-4: Evolution de la teneur en phosphore assimilable en fonction de la teneur en gypse et du temps pour les traitements avec apport de D2 d'engrais

-a- Phosphore joret hebert -b- Phosphore Olsen

La diminution des teneurs en phosphore assimilables après fertilisation par le TSP, est notée aussi bien pour le sol sans gypse que pour le sol à apport en cet élément. Elle peut s'expliquer comme suit :

Pour le traitement sans gypse ; Après apport de TSP qui est un engrais soluble à l'eau, se dissout dans la solution du sol après irrigation et réagit vite avec les constituants du sol. L'apport d'engrais à un sol déplace l'équilibre chimique que ce dernier essaye de rétablir, comme une réaction première qui se réalise dans le sol, les phénomènes d'adsorption sont rapides, il y a d'abord adsorption du phosphore sur l'argile qui fait un constituant important du sol ayant l'objet de cette étude, l'adsorption spécifique sur les argiles peut se faire par des échanges de ligands, uniquement sur les bordures des feuillets d'argiles (Vanden Bossche, 2002), le phosphore se fixe sur le complexe adsorbant présentant un taux de saturation élevée, saturé par les cations Ca^{2+} , ces processus contribuent à son blocage, le phosphore se transforme en produit peu stable, métastable et à la fin stable, les réactions de précipitation sont lentes.

Le blocage du phosphore était élevé, le sol sans gypse présente un pouvoir fixateur élevé déjà étudié au début. Le sol retient le phosphore apporté, en effet l'apport de quantités supplémentaires de phosphore au sol conduit à un déséquilibre chimique. Pour retrouver un

nouvel équilibre le sol fixe et adsorbe les quantités supplémentaires par l'apport de l'engrais (Fardeau, 1993), cette réaction du sol est rapide au début puis se ralentit. Les quantités retenues augmentent en fonction du temps.

Pour les traitements à gypse ; Pour le traitement SG5 à apport d'engrais, la rétention est moindre par rapport au SG0 à même apport, le gypse a un double effet, au début il y a insolubilisation du phosphore par réaction avec les Ca^{2+} apportés par le gypse, après solubilisation de gypse, il y a diminution du pH, et le gypse à faible quantité peut jouer un rôle d'inhibiteur de la précipitation des orthophosphates, ainsi que l'amélioration des orthophosphates déjà précipités. En effet, en solution, les sulfates de calcium entraînent la précipitation de l'apatite mal cristallisée avec libération de l'acide sulfurique qui abaisse le pH du sol et interrompt la réaction et limite la cristallisation. Il est important de signaler qu'après irrigation du sol à faible teneur en gypse, il y a un déplacement de ce dernier en profondeur du pot, suite à sa solubilisation. À l'apport de la dose D2 du TSP, le gypse n'a plus d'effet sur l'insolubilisation du phosphore à 36 jours. Ce ci serait dû à la saturation des sites de fixation de P par l'augmentation du potentiel du phosphore labile ce qui diminue l'énergie de fixation du phosphore. Gachon (1988) signale que pour accroître l'offre du sol, il est nécessaire d'investir d'autant plus d'engrais phosphatés soluble que le sol possède un fort pouvoir fixateur, observation conforme au concept à dose isodyname proposée par Demolon et al (1953) dit par l'auteur précédent. Aussi, selon Halvin et Wetsfalle (1980) l'apport de dose d'engrais de 200 à 500ppm à deux sols calcaires en KANSAS sature les sols respectivement en phosphate octacalcique, et en phosphate dicalcique, With et Ellis (1965) cité par les mêmes auteurs notent qu'il y a une adsorption maximale pour le CaCO_3 vis-à-vis du phosphore qui est de 25mg/kg.

Les quantités du phosphore bloqués augmentent proportionnellement avec la teneur en gypse, ce dernier enrichit la solution du sol et sature le complexe adsorbant en Ca^{2+} , qui contribuent encore à la fixation du phosphore, aussi comme l'ont montré, Freeman et Rowell (1981), le phosphore peut se fixer sur la surface de la calcite et donc sur la surface de gypse, cette fixation est signalée par Panahi Kordlaghari (2006) et Gachon (1972), le pouvoir fixateur augmente proportionnellement avec la teneur en gypse, il est très élevé, donc les sols à teneurs élevées en gypse peuvent fixer de très grande quantité de phosphore apporté au sols ce pouvoir contrôlent la concentration de cet élément dans le sol

Avec apport d'engrais aux traitements SG20, SG40 et SG60 les taux d'insolubilisation du phosphore par le gypse sont moindres par rapport au sol témoin que pour ces mêmes traitements sans apport d'engrais. Le sol SG0 contribue à la fixation du phosphore par ces caractéristiques, cette contribution est plus importante que la concentration en P dans la solution du sol est plus élevée.

En effet, après apport de forte dose d'engrais, le sol et le gypse fixent le phosphore, la quantité fixée par le gypse à D2 sont plus élevées que celles fixées à D1. Ce qui a été montré par Cho (1991) dans une étude sur l'insolubilisation du phosphore dans un système saturé (complexe d'échange cationique et solution) en Ca^{2+} , il avait montré que le phosphore se fixe d'abord sur le complexe d'échange cationique, puis sur le Ca^{2+} libre et à la fin s'adsorbe sur la surface de la calcite. Cette théorie peut être appliquée à notre cas (sols à gypse) et dire que le phosphore se fixe d'abord sur les sites du complexe d'échange cationique du sol qui est riche en Ca^{2+} , ensuite réagit avec les Ca^{2+} libres dans la solution du sol est apporté par le solubilisation de gypse et puis se fixe sur la surface de gypse, donc à l'apport de D2 (500ppm) ; Le phosphore apporté sature les sites de fixation sur le complexe adsorbant qui devient de plus en plus saturé en Ca^{2+} que l'on apporte de gypse (il peut être saturé à 100%) (La saturation est plus élevée dans les sols à fortes teneurs en gypse car la CEC diminue en fonction de l'augmentation des taux de gypse dans le sol est due à la neutralité de ce dernier et à la diminution de la quantité du sol). Après saturation de ces sites, le phosphore réagit avec le Ca^{2+} libre dans la solution du sol résultant de la solubilité de gypse qui n'est pas très importante (faible solubilité de gypse) ensuite il s'adsorbe sur la surface de gypse qui peut représenter le facteur principal de l'insolubilisation du phosphore. Donc à D2 d'engrais la contribution de gypse à la fixation du phosphore est plus important car les sites de fixation du phosphore sur le complexe adsorbant sont saturés. A l'apport de D1 la saturation est moindre.

La diminution des teneurs en phosphore assimilable est due surtout aux phénomènes d'adsorption qui sont rapides au début. En présence de la calcite dans le sol, cette dernière favorise plutôt la nucléation et la croissance du phosphate de calcium ce qui est prouvé par Freeman (1981), ainsi que Syers et Curtin (1989) qui ont montré ce phénomène par l'étude d'une surface de calcite à microscope électronique à balayage des rayons X. Cette adsorption s'opère réellement, mais elle correspond à une période courte, avant la nucléation d'un phosphate de

calcium qui s'apparente à de la croissance cristalline. Panahi Kordlaghari (2006) et Gachon (1972) ont montré que le phosphore peut s'adsorber sur la surface de gypse et être précipité, cette adsorption peut s'expliquer de la même manière que pour la calcite. Les phosphates apportés au sol sont fixés, ce qui aboutit à la faible fertilité phosphatée des sols gypseux.

Les coefficients de corrélation liants la teneur en gypse à la quantité de P_{jh} et P_{ols} sont négatifs et significatifs (à 5%) (tableau II-3 et 4), ce qui prouve que le gypse a un effet négatif sur les teneurs en phosphore assimilable, la teneur en phosphore assimilable diminue en fonction du taux de gypse.

Tableau II-3: Coefficients de corrélation liants la quantité de P_{jh} à la teneur en gypse

Type de corrélation	A 21 jours	A 36 jours	A 51 jours
D0-gypse	-0.98	-0.97*	-0.90
D1-gypse	-0.95*	-0.93*	-0.95
D2-gypse	-0.99	-0.96	-0.94*

Tableau II-4: Coefficients de corrélation liants la quantité de P_{ols} à la teneur en gypse

Type de corrélation	A 21 jours	A 36 jours	A 51 jours
D0-gypse	-0.97*	-0.92*	-0.88*
D1-gypse	-0.92*	-0.91*	-0.95*
D2-gyps	-0.96*	-0.90*	-0.95*

* : corrélation significative à 5%.

Le traitement statistique a confirmé les résultats obtenus, l'analyse de la variance a montré une différence significative entre les traitements d'une même dose d'engrais (voire tableaux 10 à 15 en annexe), le test de Newman et Keuls permet de classer les traitements en groupes homogènes tableau II-5 (les mêmes pour P_{jh} et P_{ols})

Tableau II-5 : Classement des traitements (P_{jh} et P_{ols}) à même dose d'engrais en groupes homogènes (test à 5%)

Traitements	D0	D1	D2
SG0	A	B	B
SG5	B	A	A
SG20	C	B	C
SG40	D	C	D
SG60	E	D	E

Ce classement montre que pour les traitements sans engrais, le traitement SG0 présente la teneur la plus élevée en P_{jh} ou P_{ols} suivi du traitement SG5, ensuite du SG20, puis du SG40. Le SG60 étant classé le dernier. Pour les traitements à apport de D1, le SG0 et SG5 sont classés dans le même groupe homogène, donc, l'apport d'engrais a amélioré la teneur en phosphore du traitement à 5% de gypse, suivi du SG20, puis du SG40 et à la fin du SG60. Pour les traitements à apport de D2, le traitement SG5 est classé dans le groupe A, donc présente une teneur en phosphore assimilable supérieure à celle du sol sans gypse, ce qui indique que le gypse a exercé un effet favorable, il est suivi du traitement SG0, puis du SG20, ensuite du SG40 et à la fin du SG60.

L'apport d'engrais a montré une augmentation des teneurs en P_{jh} et P_{ols} par rapport aux traitements sans apport d'engrais (figure II 5 et 6).

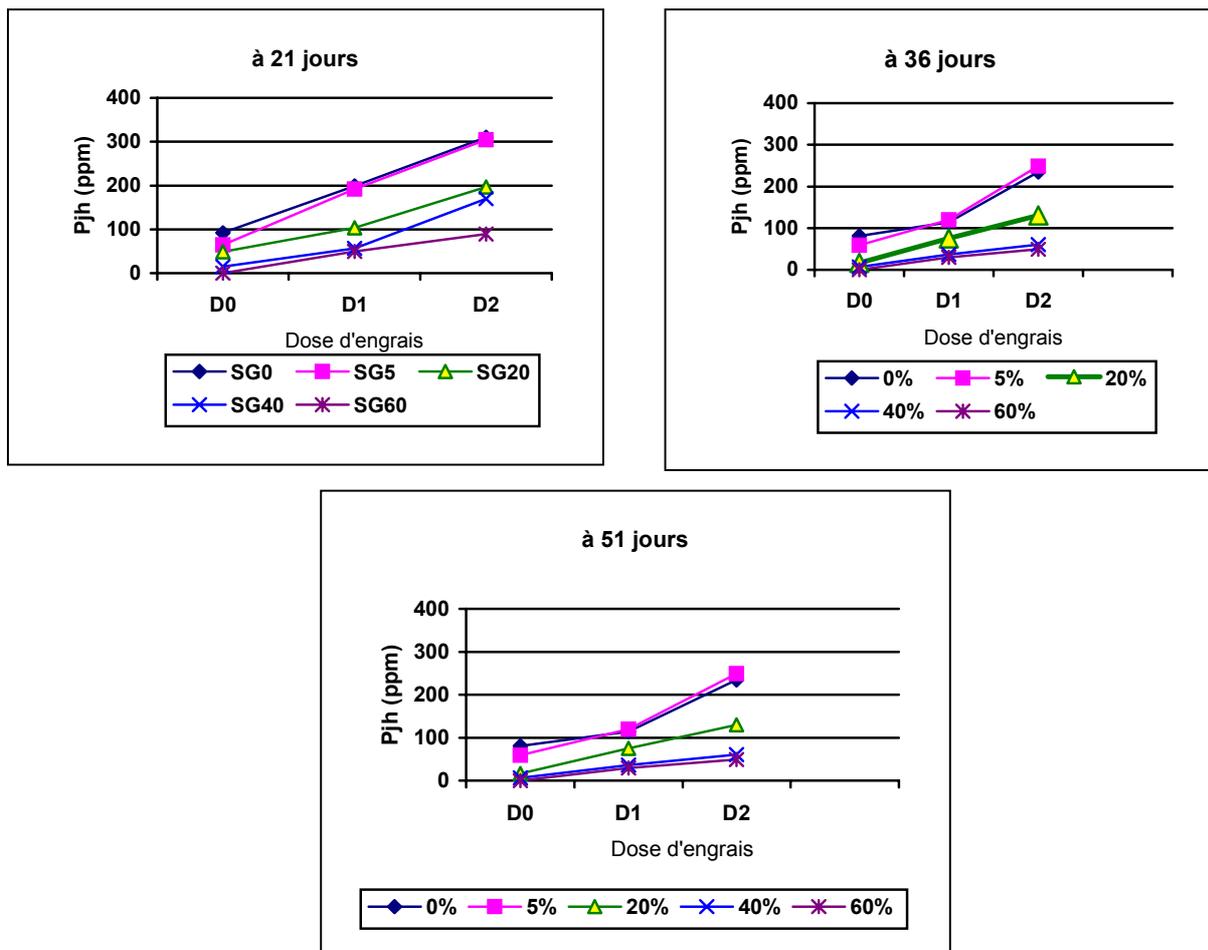


Figure II-5: Evolution de la teneur en phosphore joret-hebert en fonction de la dose d'engrais et du taux de gypse

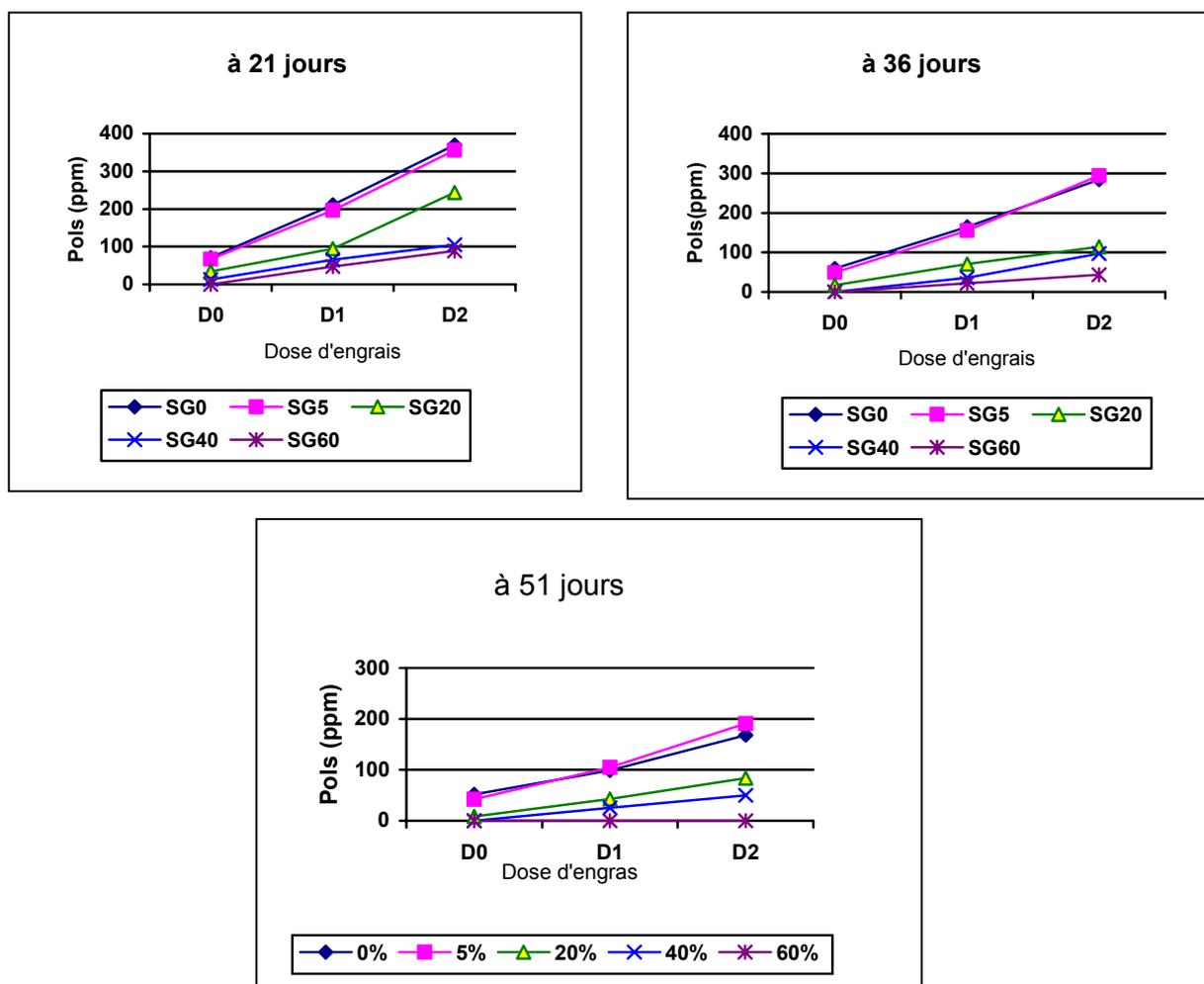


Figure II-6 : Evolution de la teneur en phosphore Olsen en fonction de la dose d'engrais et du taux de gypse

Les coefficients de corrélation liants la dose d'engrais apporté et la teneur en P_{jh} et Pols sont positifs et significatifs (tableau II-6 et 7). L'apport d'engrais a un effet positif sur les teneurs en phosphore par rapport aux traitements sans apports.

Tableau II-6 : Coefficients de corrélation liants la teneur en P_{jh} à la dose d'engrais

Type de corrélation	SG0-engrais	SG5-engrais	SG20-engrais	SG40-engrais	SG60-engrais
A 21 jours	0.99*	0.99*	0.97*	0.96*	0.99*
A 36 jours	0.99*	0.94*	0.98*	0.96*	0.99*
A 51 jours	0.94*	0.97*	0.99*	0.99*	0.99*

* : corrélation significative à 5%.

Tableau II-7 : Coefficients de corrélation liants la teneur en Pols à la dose d'engrais

Type de corrélation	SG0-engrais	SG5-engrais	SG20-engrais	SG40-engrais	SG60-engrais
A 21 jours	0.99	0.99	0.97	0.99	0.99*
A 36 jours	0.99*	0.99*	0.99*	0.98	0.99
A 51 jours	0.99	0.99*	0.99	-	-

* : corrélation significative à 5%.

Pour comparer tous les traitements entre eux, nous avons réalisé une analyse de la variance et déterminé l'effet combiné des taux de gypse et de la dose d'engrais apportée sur les teneurs en Pjh et Pols des différents traitements à la fin de l'expérimentation

L'analyse de la variance des résultats (Pjh et Pols) a montré une différence significative entre les traitements (voire annexe tableau 10 et 11). Le test de Newman et Keuls a permis de classer les traitements en différents groupes homogènes désignés dans les tableaux II-8 et 9 par ordre de décroissance des teneurs en Pjh ou Pols.

Tableau II-8 : Classements des traitements (Pjh) à différentes doses d'engrais en groupes homogènes (test à 5%)

Traitements	Groupes
SG5D2	A
SG0D2	B
SG20D2	C
SG5D1	D
SG0D1	E
SG0D0	F
SG20D1	G
SG40D2	H
SG5D0	I
SG60D2	J
SG40D1	K
SG60D1	L
SG20D0	M
SG40D1	N
SG60D0	O

Tableau II-9 : Classements des traitements (Pols) à différentes dose d'engrais en groupes homogènes (test à 5%)

Traitements	Groupes
SG5D2	A
SG0D2	B
SG5D1	C
SG0D1	D
SG20D2	E
SG0D0 SG40D2	F
SG20D1,SG5D0	G
SG40D1	H
SG20D0	I
SG60D2, G40D2, SG60D0, SG60D1	J

Pour le Pjh, le traitement SG5D2 a présenté les meilleurs résultats suivit du traitement SG0D2, puis du SG20D2 qui a donné des résultats encore meilleurs que ceux des traitements SG0D1 et SG5D1.

Le traitement SG5D0 a présenté les plus faibles teneurs par rapport au traitement SG0D0, mais après apport d'engrais il présente des valeurs meilleures. L'apport d'engrais et 5% de gypse à un sol améliorent sa teneur en Pjh par rapport aux traitements sans gypse et ayant subit l'apport de la même dose d'engrais.

L'apport de 500ppm de TSP à un sol à 20% de gypse a amélioré la teneur en Pjh de ce dernier, ces sols peuvent être fertilisé efficacement..

Les traitements SG40 et SG60 ont présenté des teneurs plus faibles même après apport de la dose de 500ppm par rapport au sol sans gypse et sans engrais, la fertilisation phosphatée est inefficace.

Pour le Pols, le traitement SG5D2 montre toujours les résultats meilleurs suivit aussi par SG0D2, ensuite SG5D1 et SG0D1.

Le traitement SG20D2 est classé après les traitements SG5D1 et SG0D1, mais présente toujours des teneurs meilleurs que celle du traitements sans gypse et sans engrais, donc l'apport de 500ppm a un sol à 20% de gypse a donné un bon résultats par rapport au sol sans gypse et sans engrais. Il est suivit du traitement SG40D2 qui est classé avec le traitement SG0D0, et SG60 à 3 dose d'engrais. Nous remarquons que les trois traitements SG60D0, SG60D1 et SG60D2 sont classés ensemble dans le même groupe homogène, ce qui indique que l'apport d'engrais à un sol

à 60% n'est pas efficace.

La différence de classement entre les deux méthodes est due au produit extractif utilisé, la méthode Joret Hebert extrait des formes de phosphore inassimilable car elle est plus agressive.

Pour montrer la relation entre les teneurs en phosphore assimilable (Joret-Hebert et Olsen) et la teneur en gypse et la dose d'engrais, les coefficients de corrélations et de régressions multiples sont calculés, ils sont significatifs

Pour le P_{jh} : $r=0.9041^*$

Pour le P_{ols} : $r = 0.9105^*$

* : corrélation significative à 5%.

Les équations de régression linéaires sont :

$$P_{jh} = - 2.1474\text{gypse} + 0.2238\text{engrais} + 81.9435 \quad r^2 = 0.8174$$

$$P_{ols} = - 1.9046\text{gypse} + 0.15617\text{engrais} + 66.4358 \quad r^2 = 0.8292$$

Les deux équations précédentes permettent la prédiction des teneurs en phosphore assimilable Joret hebert ou Olsen en fonction de la teneur en gypse et de la dose d'engrais pour notre cas.

1.2.2 Evolution des teneurs en phosphore assimilable par rapport aux teneurs initiales

Pour tous les traitements le phosphore assimilable Joret Hebert ou Olsen diminuent en fonction du temps par rapport aux teneurs initiales, et cette diminution est d'autant plus importante que la teneur en gypse est plus élevée (tableau II-12 et 13). Ce qui est montré par les figures II-7, 8 et 9.

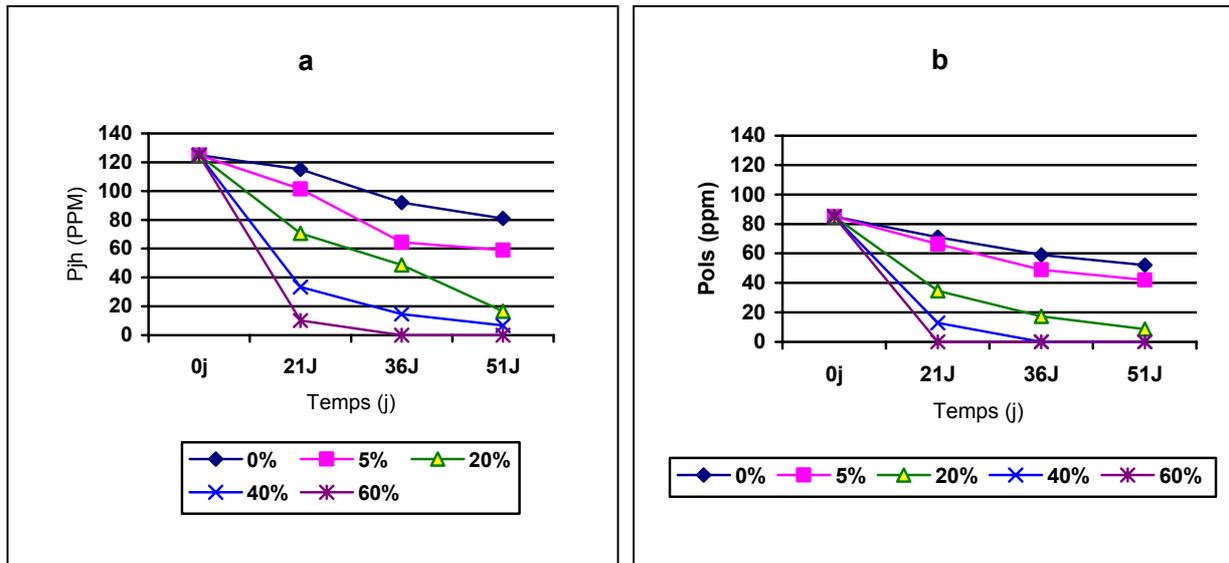


Figure II-7: Evolution de la teneur en phosphore assimilable en fonction de la teneur en gypse et du temps pour les traitements sans apport d'engrais
 -a- phosphore joret hebert -b- phosphore Olsen

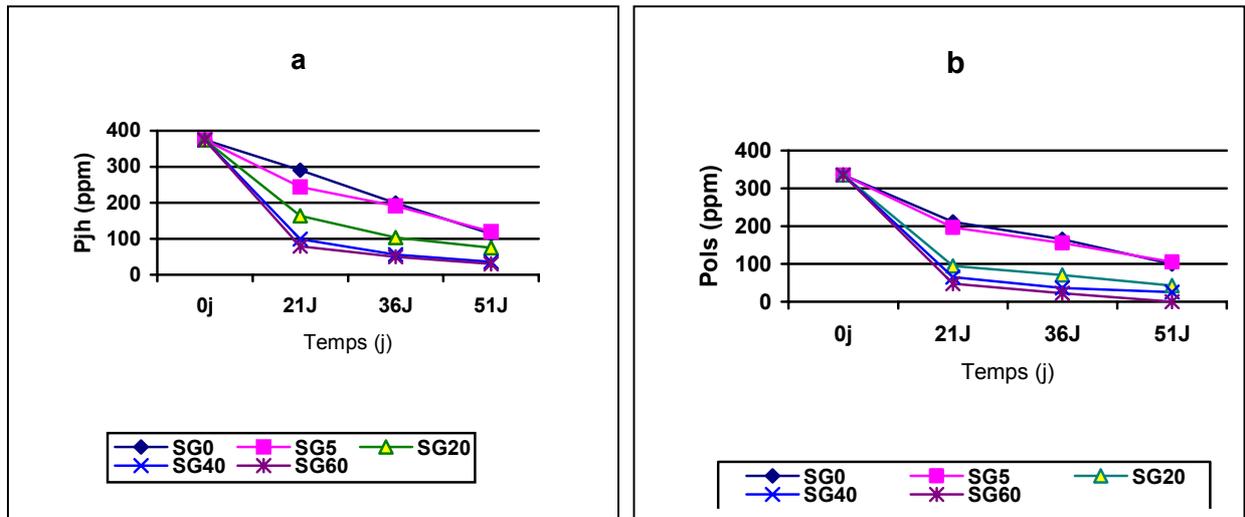


Figure II-8 : Evolution de la teneur en phosphore assimilable en fonction de la teneur en gypse et du temps pour les traitements avec apport de D1 d'engrais
 -a- phosphore joret hebert -b- phosphore Olsen

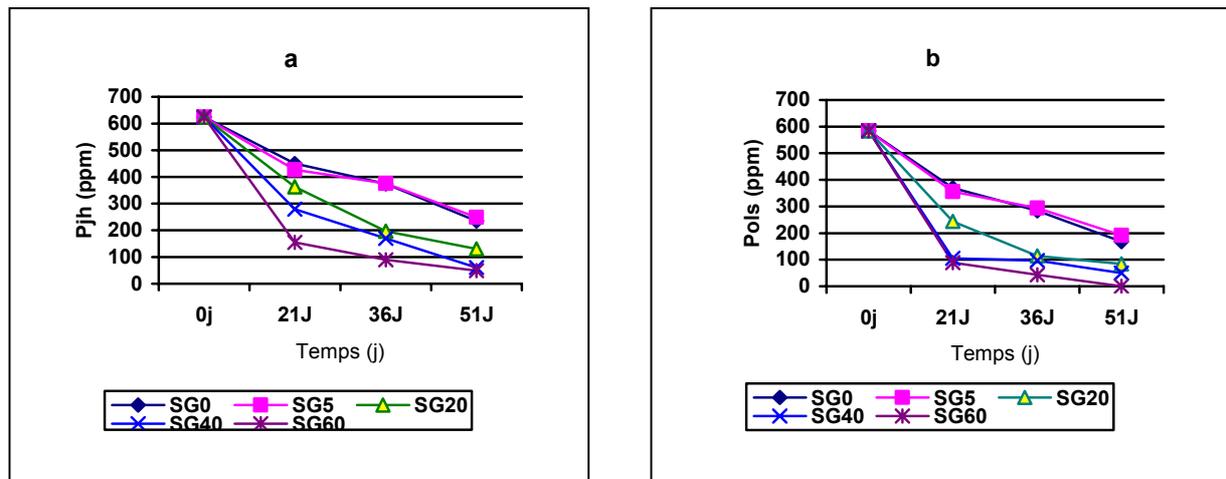


Figure II-9: Evolution de la teneur en phosphore assimilable en fonction de la teneur en gypse et du temps pour les traitements avec apport de D2 d'engrais

-a-phosphore joret hebert -b- phosphore Olsen

Les résultats précédents montrent que tous les traitements ont présenté une régression dans le temps des quantités de phosphore assimilable. Les quantités retenues sont plus importantes que la concentration en phosphore assimilable dans le sol est plus élevée, quelque soit la teneur en gypse :

Le SG0D0 a retenue 44ppm de Pjh (35.2%) et 33ppm (38.82%) de Pols, le SG0D1 a retenue 261ppm (69.6%) de Pjh et 236ppm de Pols (70.04%) , la quantité retenue est beaucoup plus importante à apport de D2, elle est de 390ppm de Pjh (62.4%) et 417ppm de Pols (71.28%). Le traitement SG5D0 a retenue plus de P que le traitement SG0D0, il a retenu 65.53ppm de Pjh (52.42%) et 43.07ppm de Pols (50.67%), ce ci peut être expliqué surtout par l'activité des cations Ca^{2+} qui devient plus intense avec apport de 5% de gypse, les quantités retenues après apport de D1 sont moindres, elles sont de 255.03ppm de Pjh (68%) et 229.89ppm de Pols (68.62%), et ce en le comparant au traitement SG0D1, ainsi que celles retenues par SG5D2 qui sont de 376.09(60.17%) de Pjh et 393.89ppm de Pols (67.33%), que celle du SG0D2. les quantités retenues sont encore plus élevées que la teneur en gypse passe de 20, à 40 et à 60% et que la concentration en phosphore est élevée, le SG60D0 a retenue tous le phosphore assimilable existant (à 100% de Pjh ou Pols). En effet le SG60D1 a retenue 345.62ppm de Pjh (92.16%) et

335ppm de P_{ols} (100%), cette rétention augmente encore en apportant la dose de 500ppm d'engrais, il a retenu 375.5ppm de P_{jh}(92.08%) (et 585ppm de P_{ols} (100%).

D'une façon générale on peut tirer les remarques suivantes :

- Sans apport d'engrais ; pour les traitements SG0D0 et SG5D0 la rétention du phosphore est presque continue dans le temps car le sol est plus ou moins équilibré chimiquement. Pour SG20D0, SG40D0 et SG60D0 la rétention en phosphore est plus marquée, elle est élevée à 21 jours par l'effet de gypse qui retient les quantités du phosphore assimilable existantes. Pour ces traitements, le gypse est le facteur principal de l'insolubilisation du phosphore, le processus d'insolubilisation semble le plus accentué avec l'importance de la teneur en gypse dans le sol. En tenant compte du facteur temps, l'insolubilisation est maximale à 21 jours, puis elle a tendance à diminuer au delà de ce seuil.
- Avec apport d'engrais ; la rétention est d'autant plus élevée surtout à 21 jours pour tous les traitements mais d'une amplitude variant selon la teneur en gypse, elle est plus élevée que la teneur en gypse est importante. Le sol témoin retient du phosphore apporté. En effet, l'apport de quantités supplémentaires de phosphore au sol conduit à un déséquilibre chimique. Pour retrouver un nouvel équilibre, le sol fixe et adsorbe les quantités supplémentaires apportées par l'engrais, cette réaction du sol est rapide au début puis se ralentie. Les quantités retenues augmentent en fonction du temps.

Pour les traitements à faible teneurs en gypse (SG5D1 et SG5D2), le taux du phosphore insolubilisé est plus important à 21 jours et diminue en fonction du temps, pour ne plus subir d'insolubilisation par le gypse à 36 jours à D2, et à 51 jours à D1 (par rapport au sol témoin), cette chute de l'insolubilisation par rapport au sol témoin peut s'expliquer par le fait du déplacement du gypse en profondeur du pot suite à sa solubilisation par l'eau d'irrigation, et la saturation des sites de fixation du P par l'engrais apporté, la fixation du phosphore est plus importante au début et diminue avec l'occupation des sites de fixation. Avec un apport élevé d'engrais, la fixation est plus rapide ainsi que la saturation, le sol à 5% de gypse devient comparable au sol témoin avec une légère amélioration du pH.

Pour les traitements à 5% de gypse et à apport d'engrais (SG5), la rétention en P est moindre par rapport au sol témoin (SG0). Le gypse à faible teneur a un double effet, selon

FAO (1990), au début il y a insolubilisation du phosphore par réaction avec les Ca^{2+} apportés par le gypse, ensuite il y a diminution de l'insolubilisation suite à l'amélioration du pH.

Pour les traitements à teneurs moyennes et élevées en gypse, la rétention est plus élevée que la teneur en gypse est grande, elle est surtout plus élevée à 21 jours suite à la présence de P en concentration élevée, et diminue après.

La fixation du phosphore est d'un rythme rapide au début et continue après mais à un rythme plus faible et devient presque stable dans le temps. Sonogor (1982) affirme que la fixation du phosphore, dans des solutions de sulfates de calcium auquel il y a apport d'une solution de phosphore, est rapide au début. Cette fixation ralentie et tend vers une limite. (Esilaba et al, 1992 ; FAO, 1990). Bell et Black, (1970) ont révélé que le phosphate dicalcique change en phosphate octacalcique en 4 semaines dans les sols à pH élevé. Cependant, Esilaba et al (1992) ont montré que l'insolubilisation se réalise en 44 semaines dans les sols à pH de 6.9 Pour les traitements à teneurs élevées en gypse, la plupart du phosphore assimilable été retenue à 21 jours, aussi Sleight et al (1984) montrèrent qu'en sols calcaires une grande quantité du phosphore est retenue après une semaine. Fardeau (1993) révèle que la quantité du phosphore retenue augmente lorsque le contact entre le sol et le phosphore apporté augmente et la concentration des ions phosphates présents dans la solution du sol tend vers une valeur d'équilibre souvent voisine de celle observée en absence d'apport. A chaque système sol-plante il existe un état d'équilibre propre, ce qui explique le cas du sol témoin.

Donc, les teneurs en phosphore assimilable diminuent en fonction du temps.

Ces résultats sont expliqués par les coefficients de corrélation liants la teneur en P_{jh} et P_{ols} au temps (tableau II-10 et 11). Ils sont négatifs et significatifs.

Tableau II-10 : Coefficients de corrélations liants la teneur en P_{jh} au temps

	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
D0	-0.97*	-0.91	-0.99*	-0.97	-0.86*
D1	-0.99*	-0.99*	-0.97*	-0.97*	-0.99*
D2	-0.98*	-0.99*	-0.97*	-0.99*	-0.99*

Tableau II-11 : Coefficients de corrélations liants la teneur en Pols au temps

	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
D0	-0.98*	-0.97*	-0.98*	-0.86*	-
D1	-0.99*	-0.99*	-0.99*	-0.96*	-0.99*
D2	-0.99*	-0.98*	-0.94*	-0.92*	-0.99*

* = Coefficient de corrélation significatif à 5%.

Les coefficients de régression multiples montrant la relation entre le P_{jh} et le Pols et le facteur temps, le taux de gypse et la dose d'engrais sont déterminés et sont hautement significatifs. Aussi les équations de régressions multiples sont déterminés comme suit :

$$\begin{aligned} \text{P}_{jh} \text{ (ppm)} &= - 2,06502\text{gypse}(\%) - 3,63784\text{temps}(\text{j}) + 0,361551\text{engrais (ppm)} + 225,105 \\ r^2 &= 71,2991\% \\ \text{Pols (ppm)} &= -2.06502\text{gypse}(\%) - 2.43253\text{temps (j)} + 0.361551\text{engrais (ppm)} + 175,554 \\ r^2 &= 79.01\% \end{aligned}$$

Dans les conditions de notre travail, a prédiction des teneurs en phosphore assimilable en fonction de la teneur en gypse, du temps et de la dose d'engrais devient possible grâce à ces équations pour notre cas.

1.2.3 Influence du gypse sur les quantités de triple phosphate apporté

Les quantités retenues du phosphore provenant de l'engrais sont déterminées par différence entre les quantités du phosphore assimilable des traitements après apport d'engrais et les quantités du phosphore assimilable des mêmes traitements sans apport. Les quantités bloquées sont de plus en plus importantes que le taux de gypse soit élevé (tableau II-12 et 13), elles sont encore plus importantes que la concentration du phosphore labile est plus élevée.

Tableau II-12 : Quantités moyennes de l'engrais bloqué du Pjh

		SG0		SG5		SG20		SG40		SG60	
		ppm	%								
21j	D1	74.49	29.96	115.97	46.38	178.49	71.39	214.62	85.84	229.05	91.62
	D2	165	33	193.48	38.69	275.8	55.16	367.62	73.52	456.34	91.26
36j	D1	143.27	53.32	130.9	52.36	216.25	86.5	230.76	92.30	234.98	93.99
	D2	282	45.12	257.3	41.56	394.71	78.94	419.56	83.91	472.9	91.26
51j	D1	217	86.8	192.96	77.18	205.27	82.10	233.96	93.58	240.99	96.39
	D2	346	69.2	321.49	64.29	473.35	94.67	471.09	94.21	485.09	97.01

Tableau II-13 : Quantités moyennes de l'engrais bloquées du Pols.

		SG0		SG5		SG20		SG40		SG60	
		ppm	%								
21j	D1	109.31	43.92	127.63	51.05	203.8	81.52	217.38	86.95	235.71	94.28
	D2	201	40.2	227.63	45.52	339.87	67.97	445.87	89.17	473.15	94.63
36j	D1	144	57.6	150.05	61.00	208.91	83.56	230.71	92.28	243.4	97.36
	D2	275	55	269.35	53.87	426	85.2	447.1	90.5	486.7	97.34
51j	D1	203	81.2	190.5	76.2	223.6	89.44	236.4	94.56	266.99	100
	D2	384	76.8	359.5	63.9	442.6	88.52	473.05	94.60	516.99	100

La détermination des taux de l'engrais retenues montre que pour le traitement SG5D1 et SG5D2, le blocage est plus faible que pour celui du SG0D1 et D2. Ce ci peut s'expliquer par l'amélioration du pH par rapport à celui du témoin, la quantité de l'engrais bloqué augmente avec la teneur en gypse, elle est de 100% pour SG60D1 et SG60D2.

Le taux de fixation diminue à D2 pour le traitement SG5D2, mais pour SG20D2, SG40D2 et SG60D2 il est plus élevé, les taux élevés de gypse fixent beaucoup plus du phosphore que la concentration de ce dernier est élevée dans le sol.

La quantité du phosphore retenu est de plus en plus importante que l'on apporte de l'engrais au sol, même résultat a été montré par FAO (1990) ainsi que par Carreria et Lajha (1997) in Vanden Bossche (1999) qui montre que l'insolubilisation du phosphore semble favorisée par les fortes concentrations en P.

Les quantités bloquées sont de plus en plus importantes que le taux de gypse est élevé, elles sont encore plus importantes que la concentration du phosphore est plus élevée, ce même résultat été montré par FAO (1990).

L'apport de dose élevée de 500ppm à améliorer la teneur des sols à 20% de gypse, ce qui prouve que ces sols peuvent être cultivés après fertilisation. Les sols à 40% de gypse nécessitent l'apport de plus grande quantité d'engrais pour être cultivés, et peuvent être non rentables économiquement. Les sols à 60% de gypse fixent beaucoup de phosphore, Jafarzadeh et Zinck (2000) ; Mashali (1996) ; Van Alphen et Rios Romero, (1971) ; FAO (1990) indiquent que les sols gypseux nécessitent de grand apport d'engrais phosphaté (spécialement TSP doté par sa solubilité) pour être cultivés.

Conclusion

Le phosphore assimilable est retenu par le sol témoin qui est caractérisé par un pH basique et un taux de saturation élevé, conditions favorables à l'insolubilisation du phosphore.

La dynamique du phosphore est influencée par le gypse, de manières différentes, suivant que ce sel se trouve dans le sol en faible ou en quantités élevées.

Les faibles teneurs de gypse, peuvent retenir certaines quantités du phosphore assimilable, mais semblent avoir un effet bénéfique, après fertilisation phosphatée sur la dynamique du phosphore dans le sol, surtout dans les conditions d'irrigation qui déplacent le gypse en profondeur.

Les teneurs moyennes et élevées de gypse affectent considérablement les teneurs en phosphore assimilable de ce dernier et provoquent sa rétention. La fertilisation s'avère améliorante pour le sol à teneur moyenne en gypse, mais n'est pas efficace à teneurs élevées.

Plus la concentration du phosphore est élevée dans le sol, plus les quantités retenues sont importantes, surtout en teneurs élevées en gypse. La rétention est aussi rapide que la concentration de la solution du sol en P est élevée.

2. Appreciation de l'assimilabilité du phosphore
par la culture du ray-grass d'Italie

2. Appréciation de l'assimilabilité du phosphore par la culture du ray-grass

2.1 Influence du gypse sur la cinétique de la croissance et les teneurs en phosphore de la plante

2.1.1 Présentation des résultats

2.1.1 Influence du gypse sur la croissance et les teneurs en phosphore de la plante

La matière sèche (Ms) produite et les teneurs en phosphore total (P) de la plante (exprimée en % de la matière sèche produite) sont déterminées à 3 coupes successives à des intervalles de temps de 21, 15 et 15 jours. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 5 (voire annexe)

Le traitement SG5 a présenté les meilleurs résultats pour les trois coupes et avec apport ou sans apport d'engrais.

2.1.1.1 Influence du gypse sans apport d'engrais

A la 1^{ère} coupe ; La quantité de matière sèche produite est plus élevée pour SG5D0 soit 0.52g ainsi que la teneur en phosphore qui est de 0.23% de Ms, diminuent pour le traitement SG0D0 et diminue de plus en plus avec les teneurs croissantes en gypse de 20, 40 et 60%. Pour SG60D0, il y a production de 0.02g de matière sèche et une teneur en P de 0.01%.

A la 2^{ème} coupe ; La matière sèche produite et les teneurs en P augmentent pour tous les traitements, mais toujours présentent la même allure que pour la coupe 1. Le SG5D0 présente les résultats les plus élevés, par la production de 0.94g de matière sèche et une teneur de 0.28 en P %, suivit du SG0D0, et diminue encore pour SG20D0, les traitements SG40D0 et SG60D0 n'ont plus produits de matière sèche, la plante a dépérit.(figure II-10 et 11).

A la 3^{ème} coupe ; La biomasse produite et les teneurs en P augmentent encore pour SG0D0 et SG5D0 et diminuent toujours pour SG20D0, avec la production de 1.26g de matière sèche pour SG5D0 et une teneur de 0.33% en P, suivit du traitement SG0D0 puis de SG20D0.

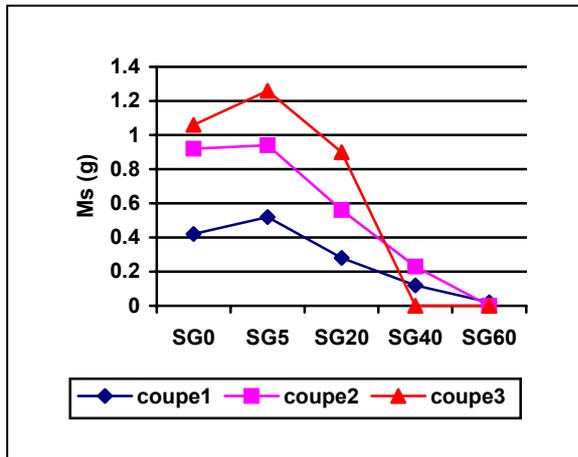


Figure II-10: Evolution de la quantité de matière sèche moyenne produite en fonction de la teneur en gypse pour les traitements sans apport d'engrais.

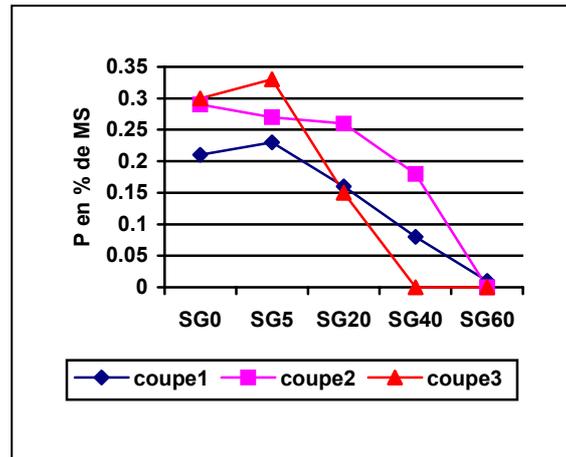


Figure II-11: Evolution de la teneur en phosphore en % de la matière sèche en fonction de la teneur en gypse pour les traitements sans apport d'engrais.

2.1.1.2 Influence du gypse après apport d'engrais

a. influence du gypse avec apport de D1

Les figure II-12, et 13, montrent que les résultats évoluent de la même manière que sans apport d'engrais, les quantités de biomasse produites et les teneurs en P sont supérieures à celles des traitements n'ayant pas subis d'apport d'engrais.

A la 1^{ère} coupe : Le traitement SG5D1 présente toujours les meilleurs résultats : 0.64g de matière sèche et 0.32% de teneur en P de Ms, suit le traitement SG0D1, les résultats semblent ensuite diminuer avec l'élévation de la teneur en gypse pour les traitements SG20, SG40 et SG60, il y a production de 0.1g de biomasse et une teneur en P de 0.05% de la matière sèche pour SG60D1.

A la 2^{ème} coupe : La biomasse produite pour SG5D1 est de 1.4g et la teneur en P est de 0.37% de Ms, suivi de traitement sans gypse, et diminue encore avec l'augmentation des teneurs en gypse, atteignent les valeurs de 0.14g de matière sèche et 0.08% de P de Ms pour le traitement SG60D1.

A la 3^{ème} coupe : Il y a une production de biomasse et des teneurs en P encore les plus élevées pour SG5D1 (2.42g de matière sèche et 0.47% de teneur en P), suivi du SG0D1 en suite elles diminuent avec l'augmentation de la teneur en gypse. La plante du traitement SG60D1 a dépérit.

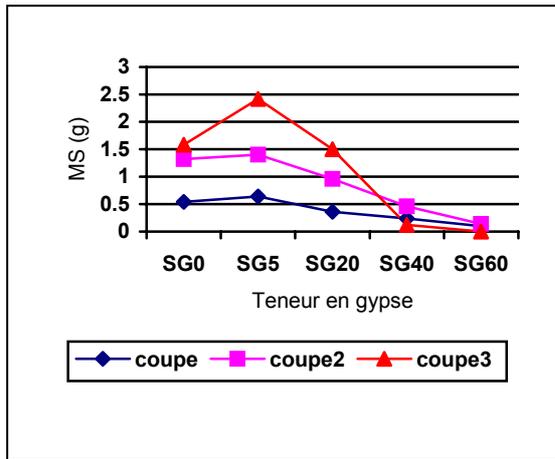


Figure II-12: Evolution de la quantité de matière sèche moyenne produite en fonction de la teneur en gypse pour les traitements à apport de la dose d'engrais D1

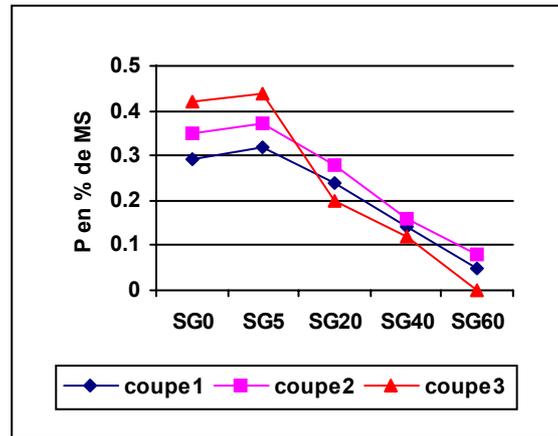


Figure II-13: Evolution de la teneur en phosphore en % de la matière sèche en fonction de la teneur en gypse pour les traitements à apport de la dose d'engrais D1

b. Influence du gypse après apport de D2

La biomasse produite et les teneurs en P sont plus importants pour tous les traitements à apport de D2 que pour les traitements sans apport et avec apport de D1. L'augmentation de la concentration du phosphore assimilable dans le sol a favorisé ces deux paramètres.

A la 1^{ère} coupe ; Le traitement SG5D2 a montré la production de 0.76g de matière sèche et la teneur de 0.33% de P de Ms, ces derniers diminuent dans l'ordre suivant : SG0D2, SG20D2, SG40D2, et SG60D2. Le traitement SG60D2 présentent les résultats les plus faibles (0.28g de matière sèche avec une teneur de 0.10% de P).

A la 2^{ème} coupe ; la biomasse produite et les teneurs en phosphore total de la matière sèche augmentent pour tous les traitements, avec la production de 1.58g de biomasse et la teneur de 0.47% de P de Ms pour SG5D2, ce traitement est suivit respectivement du SG0D2, SG20D2, SG40D2 et SG60D2, ce dernier a produit 0.28g de matière sèche avec une teneur de 0.12% de P.

A la 3^{ème} coupe ; le traitement SG5D2 présente les meilleurs résultats (3g de matière sèche produite et une teneur de 0.52% de P), suivi par ordre d'importance de matière sèche produite et de teneur en P, du moins en moins élevé ; SG0D2, SG20D2, SG40D2 et SG60D2 dont la plante a dépérit.

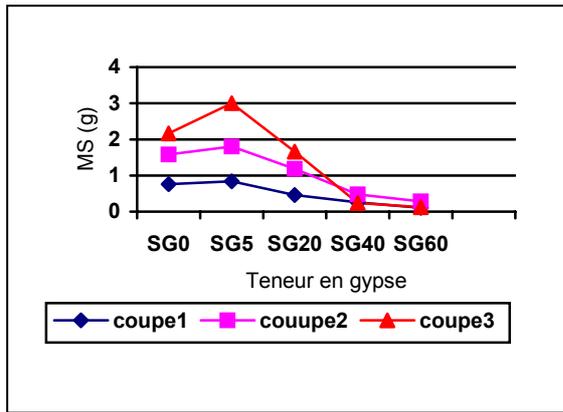


Figure II-14: Evolution de la quantité moyenne du phosphore absorbée en fonction de la teneur en gypse pour les traitements à apport de la dose d'engrais D2

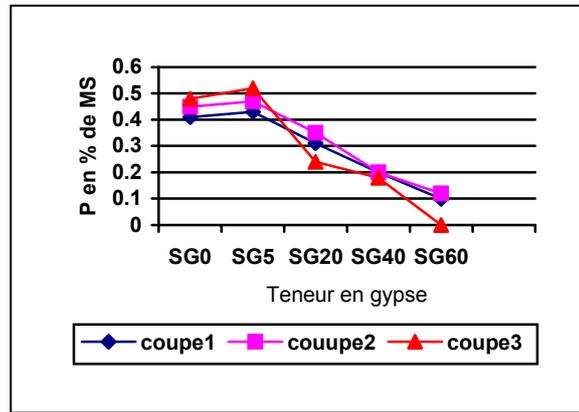


Figure II-15 : Evolution de la teneur en phosphore en % de la matière sèche en fonction de la teneur en gypse pour les traitements à apport de la dose d'engrais D2

Les résultats précédents montrent que la matière sèche produite ainsi que les teneurs en de P de la matière sèche, augmentent en fonction de la dose d'engrais pour les 3 coupes ce qui est montré par la figure II-16 et 17.

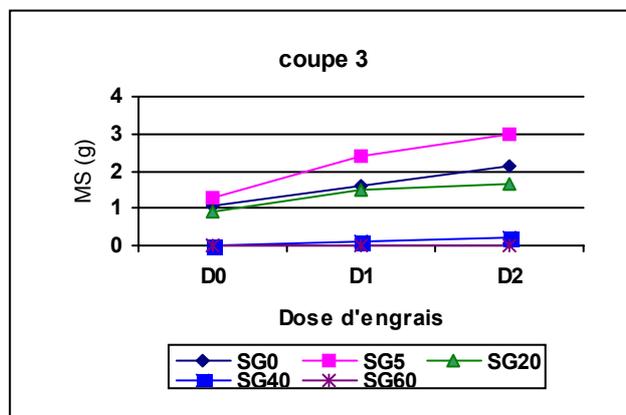
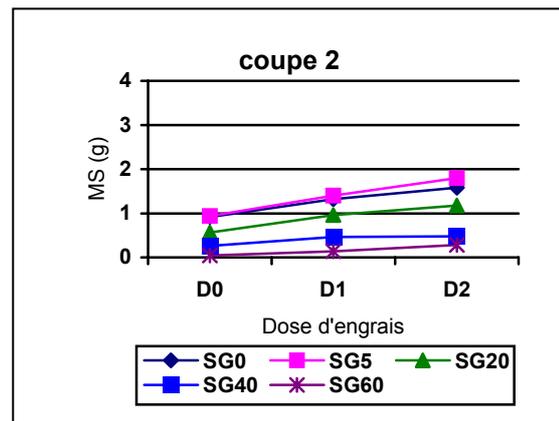
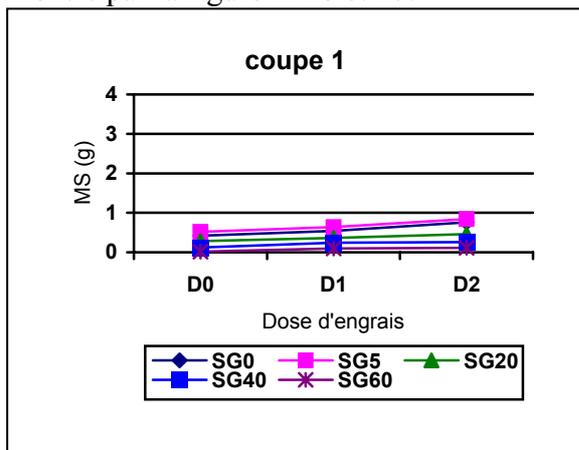


Figure II-16 Evolution de la quantité de matière sèche moyenne produite en fonction de la teneur en gypse et de la dose d'engrais

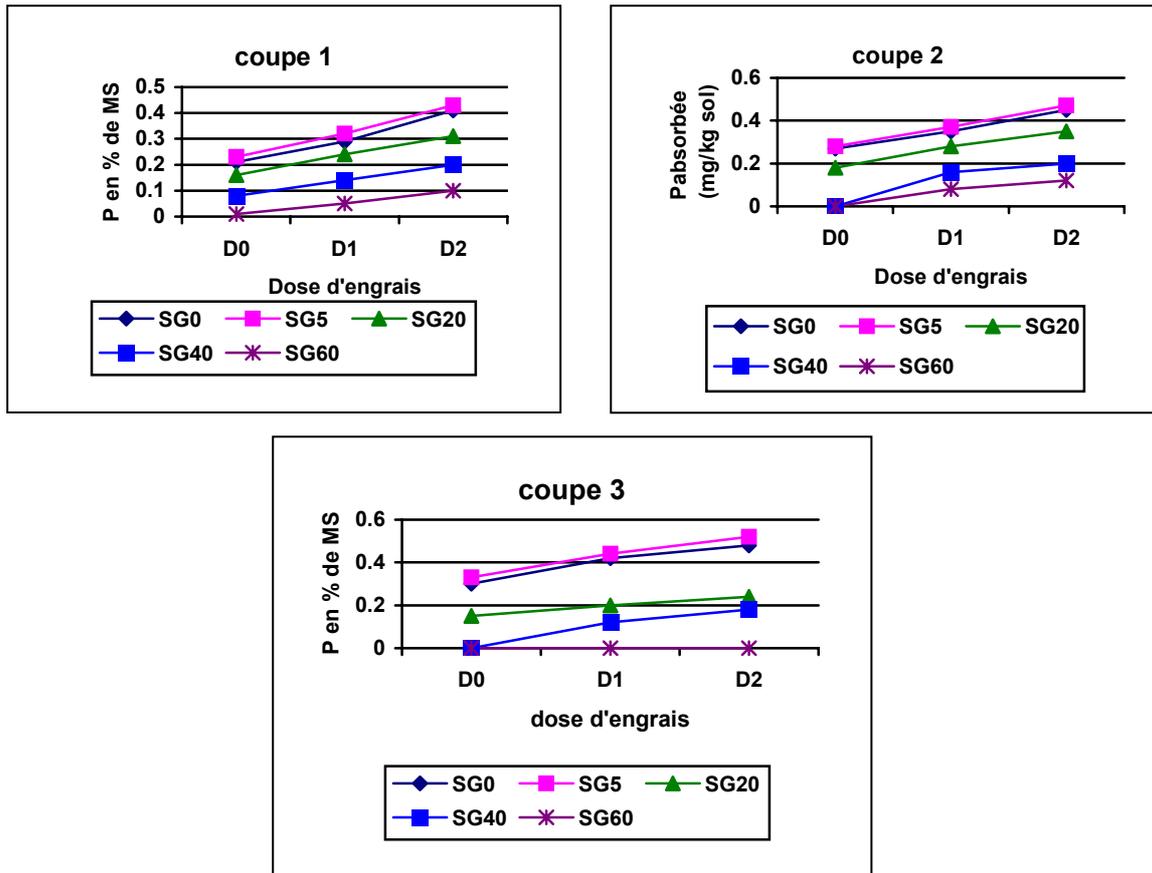


Figure II-17 : Evolution de la teneur en phosphore en % de la matière sèche en fonction de la teneur en gypse et de la dose d'engrais

La matière sèche produite augmente dans le temps pour SG0, SG5 et SG20, augmente également pour SG40 et SG60 à la deuxième coupe pour enfin diminuer voire même s'annuler à la troisième coupe pour ces traitements (figure II -18).

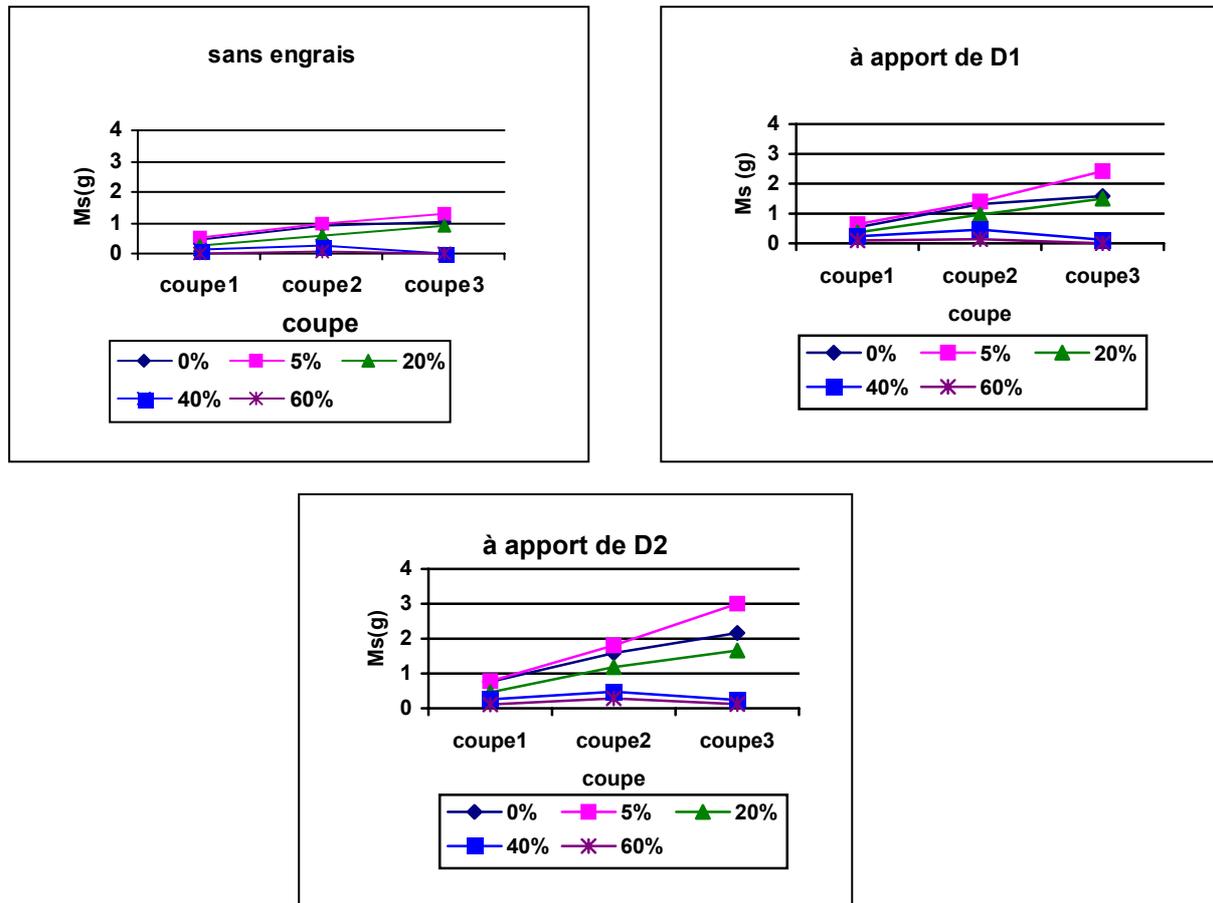


Figure II-18 : Evolution de la croissance en fonction de la teneur en gypse et du temps pour les traitements

Pour étayer ces observations, les coefficients de corrélation liants la matière sèche produite au temps sont calculés (tableau II-14).

Tableau II-14 : Coefficients de corrélation liants la biomasse produite au temps

Type de corrélation	SG0-temps	SG5-temps	SG20-temps	SG40-temps	SG60-temps
D0	0,95*	0,99*	0,99*	-0,86	-0,86
D1	0,96*	0,99*	0,99*	-0,34	-0,69
D2	0,99*	0,99*	0,99*	-0,07	-0,38

- : coefficients de corrélation significatifs à 5%.

Les coefficients de corrélation sont significatifs pour SG0 et SG5, ce qui signifie que la croissance est liée au facteur temps, donc elle se poursuit et augmente en fonction du temps, alors qu'ils sont faibles et non significatifs pour SG40 et SG60 (D0, D1 et D2), d'où la croissance diminue ou s'annule à la 3^{ème} coupe.

Les teneurs en phosphore total des plantes augmentent pour les traitements SG0, SG5 en fonction du temps, mais augmentent pour SG20, SG40 et SG60 à la deuxième coupe et diminuent à la troisième coupe (la plante dépérit) (figure II- 19)

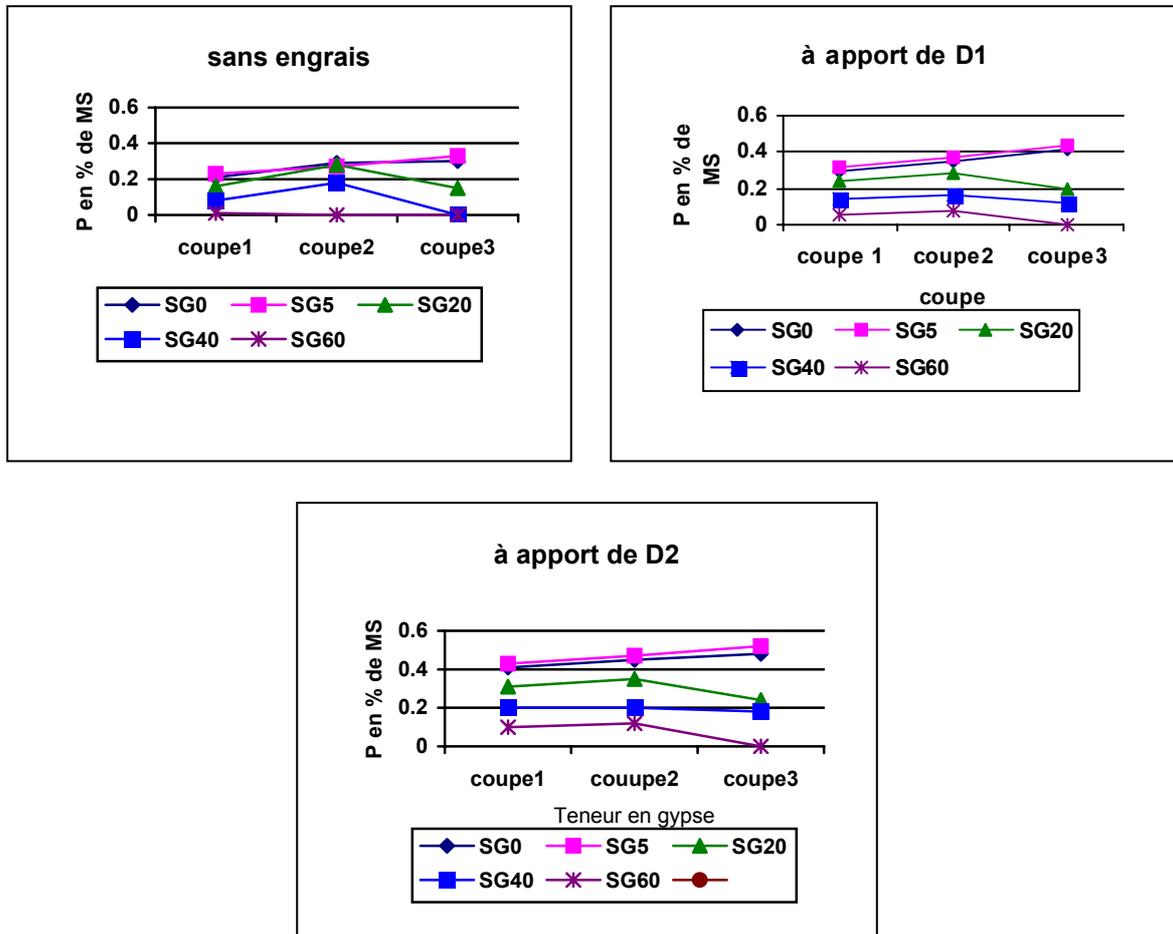


Figure II-19 : Evolution de la teneur en phosphore en % de la matière sèche en fonction de la teneur en gypse et du temps

2.1.1.2 Influence du gypse sur les taux d'accroissement

L'influence du gypse sur l'évolution de la matière sèche en fonction du temps est montré par les taux d'accroissements. Les résultats sont résumés dans le tableau II-15.

Tableau II-15 : Taux d'accroissement des différents traitements (en %).

Temps	Dose d'engrais	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
21j	D0	14.38	19.11	16.09	34.28	33.33
	D1	15.69	14.34	12.76	29.26	41.66
	D2	16.88	14.89	13.85	26.30	21.56
36j	D0	33.15	34.55	32.18	65.71	66.66
	D1	38.37	31.39	34.04	56.09	58.33
	D2	35.11	32.96	35.54	48.09	78.44
51j	D0	54.10	46.32	51.72	0	0
	D1	45.93	54.26	53.19	14.63	0
	D2	48	53.19	50	24.89	0

Il a été constaté que pour les traitements SG0, SG5 et SG20, les taux d'accroissement augmentent en fonction du temps quelque soit la dose d'engrais apportée au sol, il sont plus faible à la 1^{ère} coupe et augmentent de plus en plus pour la 2^{ème} et la 3^{ème} coupe.

Pour les traitements SG40D0 et SG60D0 et SG60D1 et SG60D2, les taux d'accroissement sont importants à la 1^{ère} coupe, ils sont très élevés à la 2^{ème} coupe.

Pour les traitements SG40D1 et SG40D2, les taux d'accroissement augmentent à la 2^{ème} coupe et diminuent à la 3^{ème}.

De ce qui précède, les remarque préliminaires suivantes sont tirées :

Pour les traitements SG0, SG5 et SG20, la croissance se poursuit en fonction du temps quelque soit la dose d'engrais apportée, le taux d'accroissement augmente de plus en plus surtout avec apport d 'engrais.

Pour les trois coupes, les résultats montrent que la production de la matière sèche ainsi que les teneurs en phosphore total, sont élevés pour le sol à 5% de gypse par rapport au témoin et diminuent pour le autres traitements en fonction de la teneur en gypse, les valeurs augmentent en fonction de l'apport de l'engrais (en comparant le même traitement à apport d'engrais au traitement sans apport).

2.1.1.3 Influence du gypse sur la cinétique de croissance du ray-grass

Gachon et Tiboi (1988) rapportent la matière sèche à chaque coupe à la durée de croissance. Ainsi, la matière sèche produite à chaque coupe est rapportée à la durée de sa production. Cette durée pour la première coupe est de 21jours, pour la deuxième coupe de 15

jours et pour la troisième coupe de 15 jours aussi, les résultats sont exprimés en mg\j\pot de matière sèche. De cette façon la vitesse de croissance été déterminée. C'est la croissance rapportée au temps (jours) les résultats sont résumés dans le tableau 8 (annexe)

L'évolution des vitesses de croissance est montrée par la figure II-20. Cette dernière montre que les résultats évoluent, en fonction du gypse, de la même manière que pour la biomasse produite. D'une façon générale, la vitesse de croissance est la plus élevée pour SG5 suivie du SG0, puis du SG20, ensuite de SG40 et à la fin du SG60 présentant les plus faibles résultats. Ce ci quelque soit la coupe et la dose d'engrais apporté.

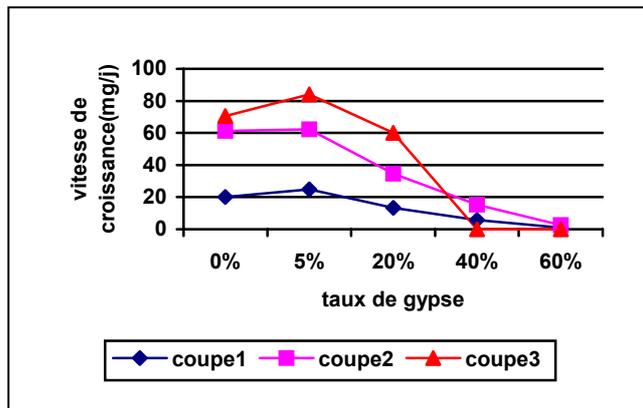


Figure II-20 : Evolution de la vitesse de croissance moyenne en fonction de la teneur en gypse pour les traitements sans engrais

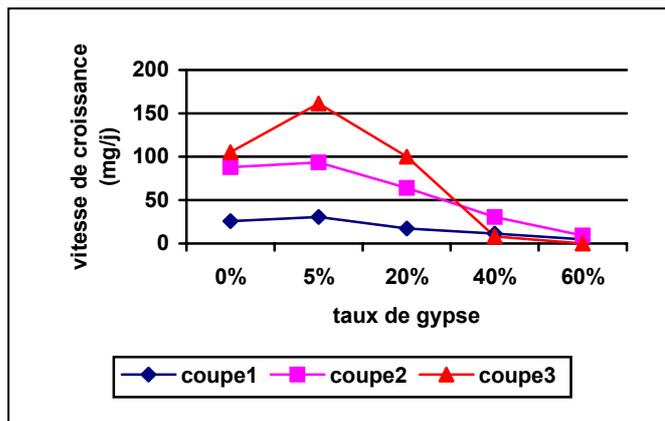


Figure II-21: Evolution de la vitesse de croissance moyenne en fonction de la teneur en gypse pour les traitements à apport de la dose d'engrais D1

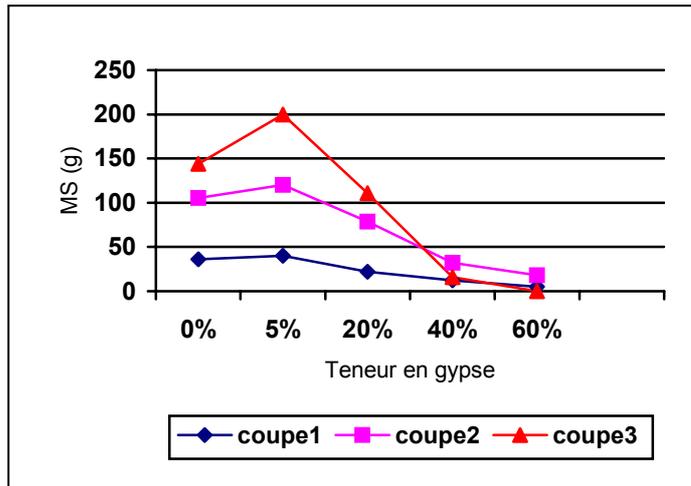


Figure II-22 : Evolution de la vitesse de croissance moyenne en fonction de la teneur en gypse et de la dose d'engrais D2

A l'exception des traitements SG5, la vitesse de la croissance diminue en fonction de l'augmentation de la teneur en gypse des sols pour les trois coupes et à différentes doses d'engrais.

Pour les traitements SG0, SG5, SG20 sans apport et à apport de D1 et D2 d'engrais, Les vitesses de la croissance et de l'absorption du phosphore par la plante augmentent régulièrement à la 2^{ème} coupe, et à la 3^{ème} coupe (figure II-23 à 25).

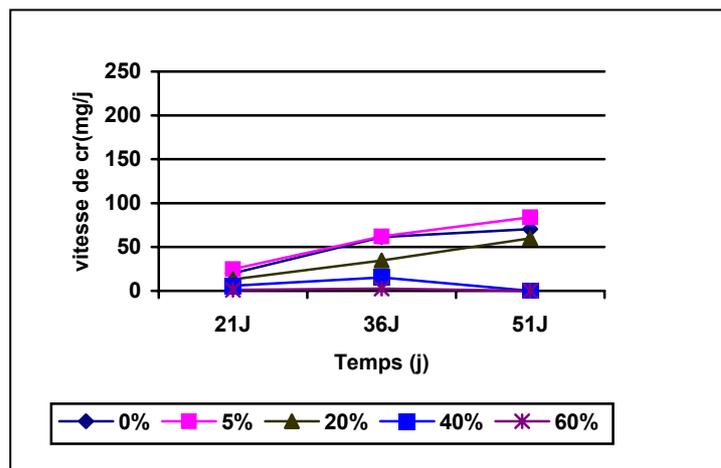


Figure II-23 : Evolution de la vitesse de croissance en fonction de la teneur en gypse et du temps pour les traitements sans engrais

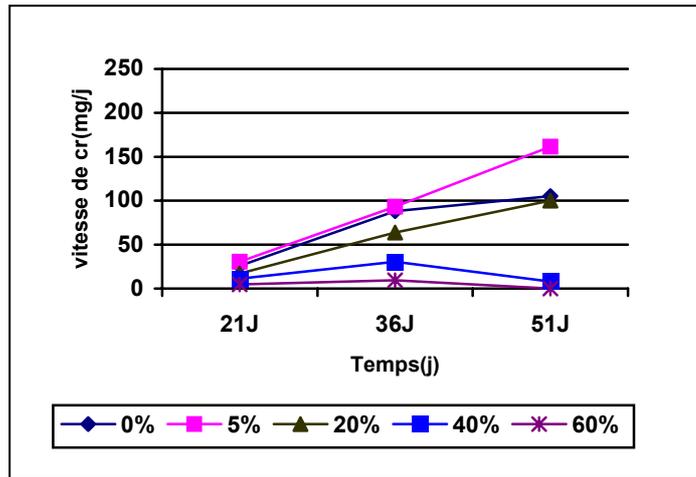


Figure II-24 : Evolution de la vitesse de croissance en fonction de la teneur en gypse et du temps pour les traitements à apport de D1

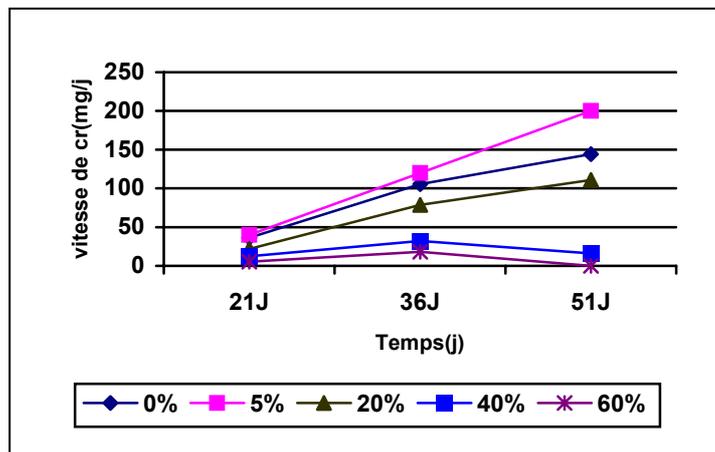


Figure II-25 : Evolution de la vitesse de croissance en fonction de la teneur en gypse et du temps pour les traitements à apport de D2

Pour les traitements SG40 et SG60 la plante croît à une faible vitesse à la première coupe, cette vitesse augmente légèrement à la 2^{ème} coupe pour être nulle pour les traitements SG40D0 et SG60D0 et SG60D1, diminuer pour SG40D1 et D2 et SG60D2.

Ces résultats sont étayés par les coefficients de corrélation liants respectivement la teneur en gypse, l'apport de l'engrais, le temps à la vitesse de croissance (tableau II-16 et 17-18).

Tableau II-16 : Coefficients de corrélation liant la vitesse de croissance à la teneur en gypse

Type de corrélation	A 21 jours	A 36jours	A 51 jours
Gypse-D0	-0.93*	-0.98*	-0.93*
Gypse-D1	-0.90*	-0.98*	-0.90*
Gypse-D2	-0.93*	-0.96*	-0.86*

* : coefficients de corrélation significatifs à 5%.

Tableau II-17: Coefficients de corrélation liant la vitesse de croissance à la dose d'engrais

Type de corrélation	SG0-engrais	SG5-engrais	SG20- engrais	SG40- engrais	SG60- engrais
A 21 jours	0.97*	0.98*	0.99*	0.92*	0.91*
A36 jours	0.99*	0.99*	0.98*	0.89*	0.99*
A 51 jours	0.98*	0.99*	0.94*	1*	0.99*

Tableau II-18 : Coefficients de corrélation liant la vitesse de croissance au temps

Type de corrélation	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
Temps-D0	0.94*	0.98*	0.99*	-0.36	-0.34
Temps-D1	0.95*	0.99*	0.99*	0.24	-0.51
Temps-D2	0.98*	1*	0.98*	0.041	-0.28

* : coefficients de corrélation significatifs à 5%.

Ces coefficients sont significatifs pour les traitements SG0, SG5, SG20 à D0, D1 et D2 et SG40 à D1 et D2 et non significatifs pour SG40D0 et SG60 à D0, D1 et D2 car la vitesse de croissance diminue ou devient nulle pour ces traitements à la troisième coupe.

Avec des taux élevés en gypse, la disponibilité du phosphore diminue en fonction du temps, la plante croit au début, son rythme de croissance diminue considérablement lorsque la quantité du phosphore assimilable diminue.

L'apport de l'engrais a amélioré considérablement la vitesse de croissance ce qui est montré par les figures II-26.

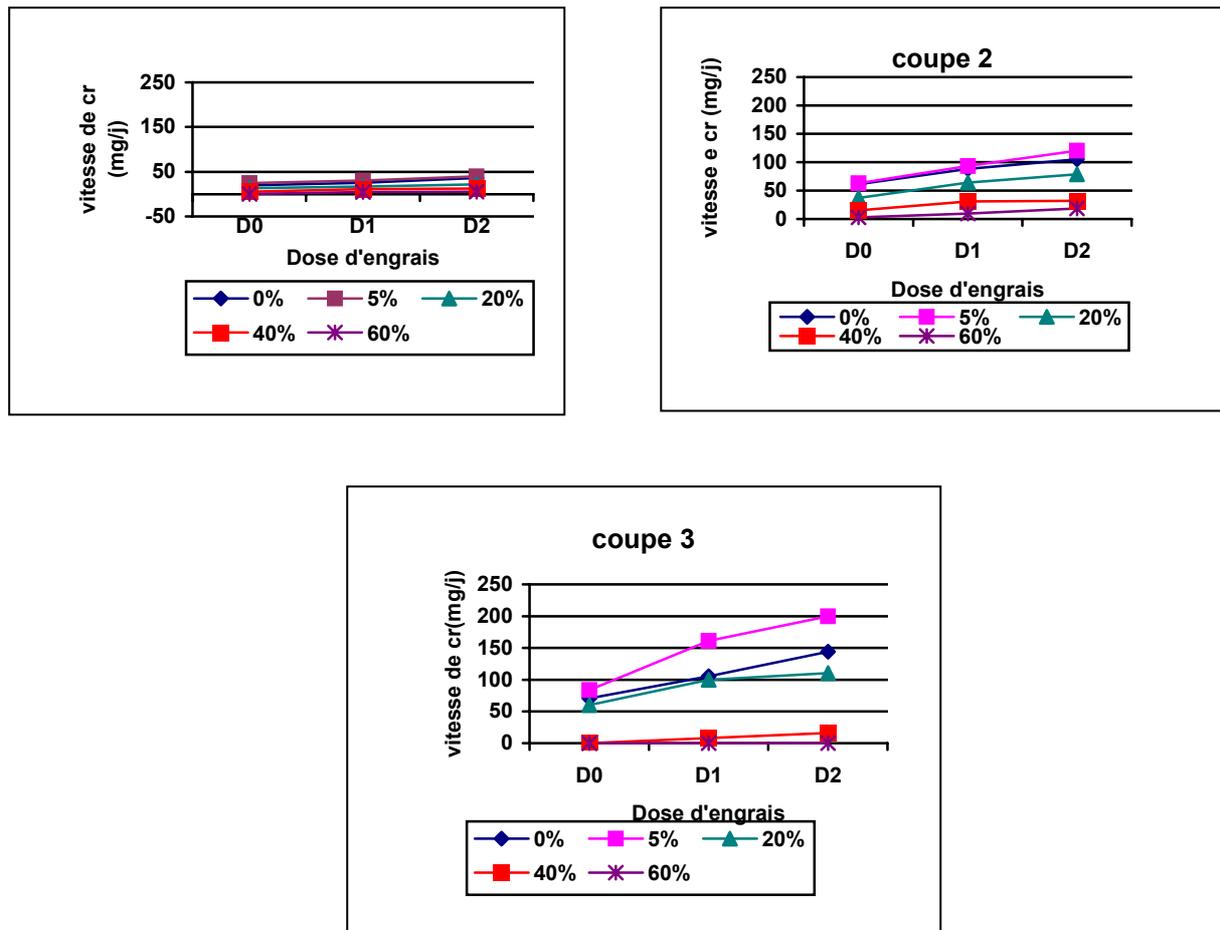


Figure II-26 : Evolution de la vitesse de croissance en fonction de la teneur en gypse et de la dose d'engrais

2.1.1.4 Influence du gypse sur les quantités de matière sèche totale produite

Les rendements en matière sèche total par la plante sont différenciés entre les traitements, cette différence est fonction des taux de gypse, de la dose d'engrais apportée et ceux pour toutes les coupes. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau II-19.

Tableau II-19 : Matière sèche totale produite en gramme par les différents traitements

	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
D0	2.4	2.72	1.74	0.35	0.06
D1	3.44	4.46	2.82	0.82	0.24
D2	4.5	5.64	3.32	0.98	0.51

Les résultats évoluent de la même manière pour les trois coupes, comme il est montré par la

figure II-27, l'évolution est comme suit :

Sans apport d'engrais ; la matière sèche produite varie en fonction de la teneur en gypse. Le traitement SG5 a présenté les meilleurs résultats, d'où la production de 2.72g de matière sèche, suivit du SG0., puis, il y a une nette diminution en fonction du taux de gypse, pour SG60, la matière sèche est de 0.06g, elle est la plus faible.

Avec apport de D1 d'engrais ; la quantité de matière sèche produite est beaucoup plus élevée avec apport d'une dose de 250ppm, en comparant chaque traitement sans engrais au traitement correspondant avec apport d'engrais, avec une production importante de matière sèche pour les traitements SG5D1, soit 4.46, suivit de SG0D1. Cette dernière diminue de plus en plus en fonction des teneurs de gypse pour atteindre une valeur relativement faible pour le traitement SG60D1, soit 0.3g de matière sèche.

Après apport de D2 d'engrais ; L'apport de 500ppm semble favoriser la production matière sèche davantage.

La biomasse végétale produite est toujours la plus élevée pour SG5D2, elle est de 5.64g de matière sèche, suivit du traitement sans gypse SG0D2 et respectivement des traitements SG20, SG40 et SG60D2, ce dernier présente une production de 0.51g de matière sèche.

Le sol à 5% de gypse présente les valeurs les plus élevées, à l'exception de ces traitements, la biomasse totale diminue en fonction de la quantité du gypse apportée.

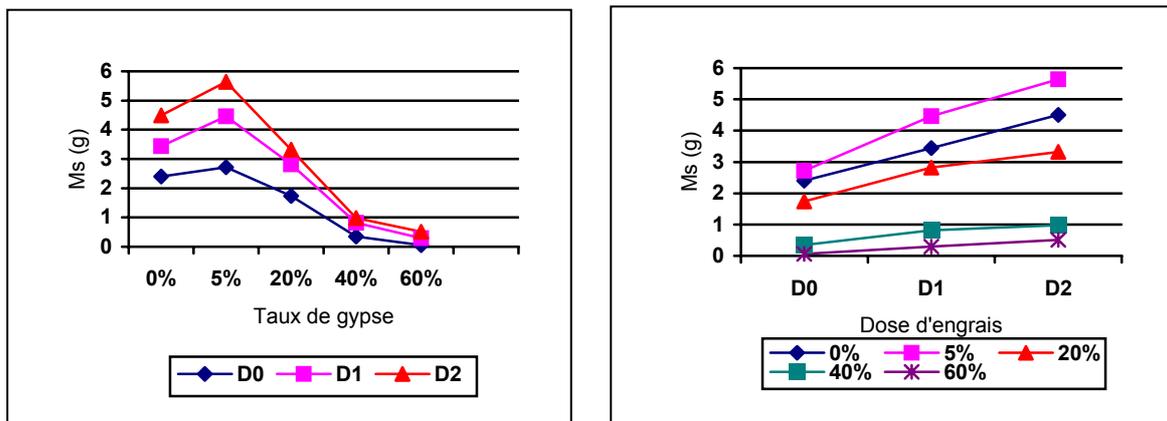


Figure II-27 : Evolution de la quantité de matière sèche produite en fonction de la dose d'engrais apportée et de la teneur en gypse

➤ **Influence du gypse sur les quantités de biomasse totale produite**

Pour montrer cet effet, l'analyse de la variance a été effectuée, et a révélé une différence très hautement significative entre les différents traitements (voire annexe, tableaux 20, 21, 22). Le test de Newman et Keuls classe de la même manière les traitements à même apport d'engrais, du moins en moins faible production de matière sèche, les traitements sont classés comme suit :

SG5> SG0>SG20>SG40>SG60 P<0.05.

Tableau II-20 : Classement en groupes homogènes des traitements (le même pour les trois doses d'engrais) pour la quantité de matière sèche totale produite (test à 5%)

Traitement	Groupes
SG5	A
SG0	B
SG20	C
SG40	D
SG60	E

Ce classement pour la quantité moyenne de matière sèche produite, montre que le traitement SG5 présente toujours le meilleur résultat suivi par le traitement SG0, ensuite SG20, puis du SG40, le traitement SG60 est classé en dernier, il présente toujours le plus faible résultat.

Les coefficients de corrélation liant la matière sèche produite à la teneur en gypse sont déterminés (tableau II-21). La corrélation est négative et significative, ce qui montre l'effet négatif du gypse sur ces deux paramètres.

Tableau II-21 : Coefficient de corrélation liant la biomasse produite à la teneur en gypse(test à 5%)

Type de corrélation	Corrélation
Gypse-D0	-0,96*
Gypse-D1	-0,94*
Gypse-D2	-0,94*

Pour les traitements SG20, SG40 et SG60, avec ou sans apport d'engrais, le gypse apporté a provoqué l'insolubilisation du phosphore, donc la diminution de la quantité du phosphore assimilable dans le sol, qui ne répond pas aux besoins de la plante, ce qui s'est manifesté par la réduction de la matière sèche produite.

➤ **Influence de l'apport de l'engrais sur les quantités de biomasse totale produite**

La quantité moyenne totale de matière sèche produite augmente en fonction de la quantité d'engrais apportée, donc plus la concentration du phosphore est élevée dans le sol, la biomasse produite est plus importante. Résultat confirmé par plusieurs auteurs dont (Berg et al, 2003).

Les coefficients de corrélation liant la biomasse produite et à la quantité apportée de TSP sont calculés. Ces coefficients sont positifs et significatifs (tableau II-22) (calculés toujours par rapport aux traitements sans apport d'engrais).

Tableau II-22 : Coefficients de corrélation liant la matière sèche totale produite à la dose d'engrais apportée

	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
Ms- engrais	0.99	0.99	0.97	0.96	0.99

➤ **Influence combinée du gypse et de l'engrais sur les quantités de biomasse totale produite**

Pour déterminer ces deux effets, une analyse de la variance est réalisée et a donnée un résultat hautement significatif (voire tableau 18, annexe). Le test de Newman et keuls permet de classer les traitements du moins en moins faible biomasse végétale, les traitements sont classés comme suit :

SG5D2>SG0D2, SG5D1> SG0D1> SG0D1> SG20D2 >SG20D1> SG5D0> SG0D0 >SG20D0 >SG40D2 >SG40D1> SG40D0 >SG60D2 >SG60D0

Tableau II-23 : Classement en groupes homogènes des traitements pour la biomasse produite

Traitements	Groupes
SG5D2	A
SG0D2 SG5D1	B
SG5D0 SG20D2	C
SG20D1 SG5D0	D
SG0D0	E
SG20D0	F
SG40D2 SG40D1	G
SG60D2 SG40D0 SG60D1	H
SG60D0	I

Pour la biomasse produite, le traitement SG5D2 a présenté les meilleurs résultats suivit des deux traitements SG0D2 et SG5D1, donc le traitement SG5D1 (à 250ppm de TSP) a présenté une biomasse analogue à celle du traitement sans gypse et apport d'une double dose d'engrais (500ppm de TSP), ce qui permet de dire que l'apport de 5% de gypse et de l'engrais à un effet très favorable sur la quantité matière sèche produite. Après, sont classés les traitements SG0D1 et SG20D2 dans le même groupe, ce qui signifie que l'apport de la dose D2 au sol à 20% de gypse donne un bon résultat par rapport même au sol témoin SG0D0 à apport de D1 (250ppm) d'engrais, donc la fertilisation est efficace pour ces sols.

Le reste des traitements ont présenté des résultats plus faibles même après fertilisation.

Le SG20D1 est classé avec le traitement SG5D0 (sans engrais) et les traitements SG40 et SG60 sont classés après le SG0D0 même avec apport de la dose de 500ppm. La fertilisation est sans aucun intérêt.

Ce classement montre que

- le traitement SG5D2 a montré les meilleurs résultats, donc, l'apport de 5% de gypse a un effet favorable sur la plante surtout après apport d'engrais
- l'apport de la dose D2 à SG20 a donné un résultat meilleur que celui des traitements SG0D0 et SG5D0, donc les sols à 20% de gypse nécessitent l'apport d'engrais pour être cultivé.
- L'apport d'engrais même à forte dose aux traitements SG40 et SG60 donne toujours de faible résultats (faible matière sèche produite et absorption du P) par rapport à SG20 même sans apport d'engrais et peuvent être, de ce fait considéré non rentable économiquement.

Aussi, une équation de régression multiple, liant la production de la matière sèche à la teneur en gypse et à la dose d'engrais :

$$Ms = 3,13983 - 0,0656867\text{gypse} + 0,003084\text{engrais} \quad r^2 = 87,352\%$$

2.1.1.5 Gain de croissance

Le gain de croissance dû à l'apport des deux d'engrais est déterminé par différence entre la matière sèche produite après apport d'engrais (D1 et D2) et la matière sèche produite sans apport d'engrais (pour un sol à même teneur en gypse). Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau II-24 : Evolution du gain de croissance en fonction de la teneur en gypse (en g).

	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
D1	1.04	1.74	1.08	0.47	0.18
D2	2.1	2.92	1.58	0.63	0.45

Tableau II-25 : Evolution des taux de gain de croissance en fonction de la teneur en gypse (en %).

	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
D1	30.23	39.01	38.29	57.31	80
D2	46.66	51.77	47.59	64.28	86.67

Après apport de la dose D1 : Le gain de croissance est plus élevé pour SG5D1 suivit du SG0 et des traitements SG20, SG40 et SG60 respectivement, dont la valeur la plus faible est notée pour SG60 (0.47g)

Après apport de la dose D2 : Le gain de croissance dans ce cas, est beaucoup plus élevé à apport de D2 que pour les traitements à apport de D1, celui-ci est toujours plus important que pour SG5D2 (2.92g), diminue pour SG0D2 (2.1g) et diminue davantage avec l'augmentation des taux de gypse dans le sol. En effet, il est pour le traitement SG60 de (0.45g).

A l'exception des sols à 5 % de gypse, les gains de croissance diminuent en fonction de la quantité du gypse dans le sol et augmente en fonction de la dose d'engrais

Les taux de gain de croissance augmentent pour les traitements SG40 et SG60 en fonction de la teneur en gypse, donc en fonction de la diminution de la quantité du phosphore assimilable dans le sol, ce qui démontre que pour les traitements à teneurs élevées de gypse, la croissance après l'apport d'engrais est supérieure à celle sans apport (le taux de gain de croissance élevé indique la faible croissance en l'absence d'engrais, cet état de fait peut être dû, pour les traitements à 60% de gypse sans engrais à la quantité du phosphore apportée par la semence). Ces taux augmentent en fonction de la quantité d'engrais apporté.

2.1.2 Discussion

Les résultats obtenus montrent que le gypse à de faible taux dans le sol à un effet bénéfique sur la biomasse produite, par contre les teneurs moyennes et élevées réduisent la production, ces deux cas seront expliqués séparément

Effet de la teneur de 5% de gypse sur la biomasse produite;

Les traitements à 5% de gypse ont présenté les meilleurs résultats. L'apport de cette quantité de gypse a probablement amélioré l'ambiance physico-chimique du sol. Le gypse a exercé un effet positif sur l'absorption du phosphore et des autres éléments nutritifs par la plante par son action sur les propriétés du sol, il a amélioré la densité de ce dernier, son infiltration et son aération. Labay et al (1988) révèlent que le gypse, lorsqu'il est présent, contrôle les propriétés mécaniques des sols. Cependant, les sols gypseux ont une faible densité, le sol témoin ayant une densité apparente élevée, soit 1.5, ce qui offre aux plantes des conditions de développement peu favorables, il est faiblement aéré, ce qui influe sur le développement du système racinaire et son activité (absorption des éléments nutritifs). L'apport de 5% de gypse a amélioré la densité apparente du sol. En effet, selon Hamza et Anderson (1999), la présence du gypse affecte la densité apparente du sol en l'affaiblissant, ce qui favorise l'aération et l'infiltration de l'eau, par conséquent les racines se retrouvent dans les meilleures conditions de développement et d'absorption. Toutefois, en présence de faible teneur en gypse, il y a une meilleure circulation de l'eau dans le sol. Halitim (1985) révèle l'absence d'adhésion entre les particules du gypse et les colloïdes, et l'existence d'un espace entre ces deux constituants permettant une meilleure circulation de l'eau, une augmentation de la CE et une meilleure structure.

Beaucoup de travaux ont prouvé l'effet favorable du gypse sur l'infiltration dans les sols très argileux tels que ceux de Miller (1987) ; Norton (1993) in Ventura et al, 2001), il stabilise la structure (Miller, 1998).

Dans notre cas, le gypse peut être considéré, surtout après apport d'engrais phosphaté, comme amendement. Utilisé, Selon Kowalenko (2004), en faible quantité, comme source de soufre, et de calcium, améliore la croissance et la qualité du fourrage. L'apport de fertilisant soufré sous forme de gypse double les rendements en fourrage, à condition que l'apport en soufre ne dépasse pas le seuil de consommation de luxe faute de quoi on assiste à une toxicité par cet élément (teneur élevée de la matière sèche en soufre sans que la matière sèche croit).

En effet, Donald et Chapman (1988) ont montré que le ray-grass peut avoir une concentration élevée en soufre sans accroître sa croissance.

Effet des teneurs élevés de gypse sur la biomasse végétale produite ;

Le gypse a provoqué un changement dans les forme du phosphore qui est devenu insoluble, et des autres éléments nutritifs par l'excès de Ca^{2+} , et SO_4^{2-} dans la solution du sol et provoque une libération du complexe adsorbant, par saturation en ions Ca^{2+} , des K^+ et Mg^{2+} . Le gypse conduit également à un déséquilibre des rapports ioniques particulièrement $\text{K}\backslash\text{Mg}$ et $\text{Mg}\backslash\text{Ca}$ qui deviennent faibles dans la solution du sol, Jafarzadeh et Zink (2000) et Van Alphen et Rios Romero (1971) ont confirmé cela, et a une compétition ionique, la présence de forte teneur Ca^{2+} et SO_4^{2-} diminue les prélèvements par la plante des autres éléments (exemple K, Mg, Mn, Fe, Cu, Zn, phosphate et nitrate).

La diminution du phosphore assimilable conduit à la réduction de la matière sèche (la photosynthèse est faible). Aussi nous avons constaté la coloration vert foncée des feuilles et la réduction de la surface foliaire qui sont signes de carence phosphatée, ce qui est montré par Colomb et al (2000) et d'un stress salin montré par Handy et Makhlouf (2000).

Le gypse peut provoquer une toxicité spécifique dû à l'excès de sulfates et de calcium, ce ci est affirmé par Mashali (1996), Villa-Castorena (2003). Sa présence dans le sol provoque une augmentation de la pression osmotique de la solution du sol, plusieurs auteurs ont montré cela dont : Hamdy et Makhlouf (2002) : Ray et al (1999), Mashali (1996), ce qui met la plante en difficulté d'absorption d'eau et des éléments nutritifs confirmée par Withney (1991), dans la nature conduit à la formation de paysages particuliers, soit occupés par une végétation naturelle spécialisée, soit à l'absence totale de végétation (Loyer, 1991). Les plantes supportant de fortes teneurs en gypse sont dites « gypsophiles » (Oxynante et Uscudero, 2003).

Aussi il est important de mentionner que les sols à teneurs élevées en gypse présentent un pouvoir fixateur élevé vis à vis du phosphore, ce qui conduit à la forte rétention des quantités du phosphore apporté. Gachon (1988) montre que le pouvoir tampon du sol contrôle l'offre potentiel de ce dernier, le sol doit posséder des réserves labiles en phosphore d'autant plus fortes que les ions phosphates sont soumis à une plus grande énergie de fixation.

Il faut signaler que le gypse se précipite et se cristallise dans les pores du sol (Shihab

et al, 2002) ce qui influe sur la perméabilité du sol et son aération ; et met les racines en conditions défavorables de développement et d'activité, ainsi, Lemerrier (2003) révèle que l'absorption du phosphore se fait en faveur de voies de circulation préférentielle de l'eau (macropores et fissures), il y a distribution mécanique du phosphore, mais en présence du gypse, il y a précipitation de ce dernier dans les pores. En effet, Vanghan et al (2002) ont observés des cristaux de gypse dans les pores radiculaires où il y a précipitation du gypse, l'extension et l'activité racinaire sont limitées. Mashali (1996) a montré que le gypse se cristallise autour des racines, ce qui réduit l'extraction de l'eau et des éléments nutritifs par la plante

Le gypse diminue la disponibilité de l'eau et des éléments nutritifs. La plante devient incapable de maintenir la turgescence des cellules, elle est en situation d'un stress salin qui conduit à un stress hydrique. Quand la pression de la solution du sol devient hypertonique, il y a plasmolyse des cellules, la teneur en eau est faible; L'entrée de l'eau dans le tissu du cortex racinaire est assurée par capillarité et par osmose, elle est beaucoup plus aisée que la solution du sol a une pression plus faible (Mengel et Kirkby, 1982). Au fur et à mesure que la salinité du sol augmente, un potentiel osmotique diminue, ce qui réduit la disponibilité de l'eau pour les plantes, à cet effet "soif" s'ajoute le niveau de salinisation important, une absorption déséquilibrée des cations qui peut conduire à l'intoxication de la plante (Kartaji, 1995 in Snoussi et Halitim, 1998).

L'effet premier de la salinité se produit dans les racines ou ce produit un déficit hydrique et une toxicité spécifique, la plante répons par une réduction de la croissance

L'excès de sels dans la rhizosphère touche tout les processus de croissance des plantes, tel que l'élongation et la division cellulaires et un endommagement de la croissance de ces dernières par accumulation de taux élevés d'ions toxiques, réduit la photosynthèse et la phosphorylation oxydative, conduit à la dépression de l'activité enzymatique spécifique, limite la formation des métabolites essentiels et par conséquence la synthèse des carbohydrates, des protéines et des acides nucléiques, ce qui est mentionné par Munns et al (1986) in Hamdy et Makhoulouf (2002).

La salinité provoque une diminution de l'élongation et de la division des cellules des feuilles, ce qui réduit la surface foliaire (phénomène de toxicité dans les feuilles) avec inhibition des réactions enzymatiques et une compartimentation inadéquate entre le

cytoplasme et les vacuoles.

Pour les traitements à faible et à moyenne teneurs en gypse l'augmentation en fonction du temps de la quantité de matière sèche produite est due à l'augmentation de la surface de contact entre sol-racine, suite à la croissance de la plante, qui fait augmenter les prélèvements du phosphore (Compaoré, 2001), Gachon et Triboi (1988) montrent que la biomasse produite augmente considérablement au cours du premier cycle entre 18^{ème} et 38^{ème} jours, selon les mêmes auteurs, la phase de 50 à 60 jours correspond à la période d'accroissement et de colonisation du sol, alors pour les traitements à fortes teneurs en gypse, le système racinaire est réduit et ne colonise pas bien le sol, par conséquent la surface du contact sol-racine est réduite. Gachon (1988) montre que la biomasse subit une variation suivant l'offre du milieu.

2.2 Influence du gypse sur les quantités du phosphore absorbé et sa cinétique d'absorption par la plante

2.2.1 Présentation des résultats :

2.2.1.1 Influence du gypse sur les quantités du phosphore absorbé

Les quantités du phosphore absorbé par la plante sont déterminées par le produit de la matière sèche produite et la teneur en phosphore de la plante (en % de la matière sèche).

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 7 (voire annexe) et montrent que l'absorption du phosphore par la plante est différenciée entre les traitements en fonction de la teneur en gypse. Le sol à 5% de gypse présente toujours les meilleurs résultats. L'évolution de ces résultats se présente comme suit :

2.2.1.1.1 Influence du gypse sur les quantités du phosphore absorbé sans apport d'engrais

Les quantités de P absorbé sont les plus élevées pour le traitement SG5D0 pour les trois coupes, suivi du SG0D0 et diminue proportionnellement avec la teneur en gypse. (Figure II-29).

A la 1^{ère} coupe ; le SG5D0 a présenté l'absorption de 1.196mg/pot de P, suivi du SG0D0, l'absorption diminue au fur et à mesure que le taux de gypse augmente, le SG60D0 présente

l'absorption la plus faible de 0.02mg\pot.

A la 2^{ème} coupe ; l'absorption augmente pour tous les traitements. Le SG0D0, SG5D0 et SG20D0, Le SG5D0 présente toujours les meilleurs résultats avec absorption de 2.632mg\pot de P, suivi de SG0D0, puis du SG20D0. A 40 et 60% de gypse la plante a dépérit.

A la 3^{ème} coupe ; l'absorption du phosphore augmente encore pour les traitements sans gypse, avec 5% et 20% de gypse, le SG5D0 présente l'absorption la plus élevée de 2.632mg\pot, suivi du SG0D0, puis du SG20D0

2.2.1.1.2 Influence du gypse après apport d'engrais sur les quantités du phosphore absorbé

- **Influence du gypse sur les quantités du phosphore absorbé après apport de D1**

Les résultats montrent que l'absorption du phosphore est plus élevée pour tous les traitements avec apport D1 que sans apport d'engrais. (figure II-29).

A la 1^{ère} coupe ; le SG5D1 présente l'absorption la plus élevée en P de 2.048mg\pot, suivi par ordre de décroissance de SG0D1, SG20D1, SG40D1 et SG60D1, ce dernier a montré l'absorption de 0.05mg\pot.

A la 2^{ère} coupe ; l'absorption de P augmente pour tous les traitements, mais présente la même allure que pour la première coupe, le SG5D1 présente l'absorption de 5.18mg\pot, le SG60D1 a présenté le plus faible résultat avec absorption de 0.112mg\pot.

A la 3^{ère} coupe ; l'absorption augmente en fonction du temps pour SG0D0, SG5D1 et SG20D1, mais diminue pour SG40D1 et SG60D1, évolue toujours de la même manière en fonction de la teneur en gypse, le SG5D1 présente l'absorption la plus élevée de 10.648mg\pot. Pour SG60D1, la plante a dépérit.

- **Influence du gypse sur les quantités du phosphore absorbé avec apport de D2**

Les quantités de P absorbées sont encore plus élevées pour les trois coupes que les

traitements à apport de D1 et sans apport d'engrais, et le SG5 présente toujours le meilleur résultat.

A la 1^{ère} coupe ; le SG5D2 présente l'absorption de 3.612mg\pot de P, suivit par ordre de décroissance de SG0D2, SG20D2, SG40D2 et SG60D2 avec absorption de 0.11mg\pot

A la 2^{ème} coupe ; l'absorption augmente pour tout les traitements, elle est de 8.46mg\pot pour SG5D0, suivi du SG0D2, et diminue en fonction de l'augmentation de la teneur en gypse, le SG60D2 présente le résultat le plus faible avec absorption de 0.336mg\pot.

A la 3^{ème} coupe ; l'absorption augmente encore pour les traitements SG0D2, SG5D2 et SG20D2, le SG5D2 présente l'absorption de 15.6mg\pot de P. l'absorption diminue cette fois ci pour les traitements SG40D2 et SG60D2 par rapport au résultats de la 2^{ème} coupe, a 60% de gypse la plante a dépérit.

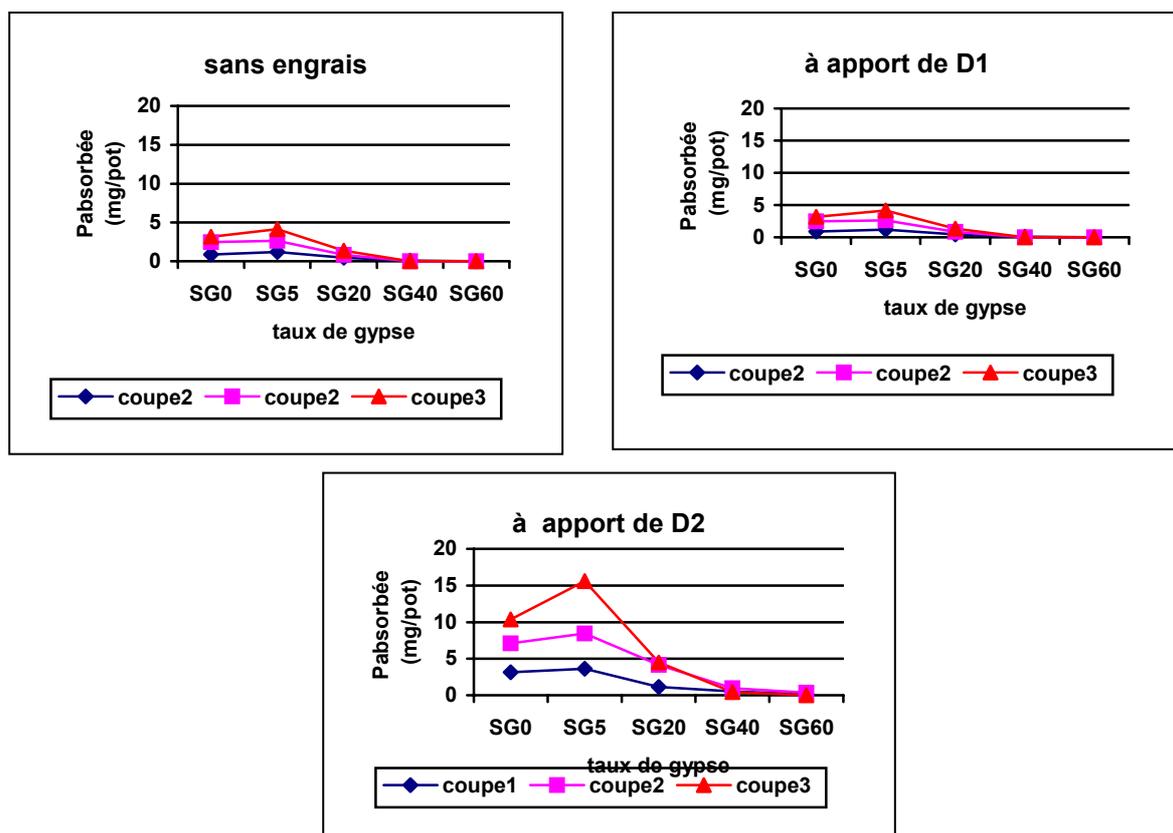


Figure II-28: Evolution de la quantité moyenne du phosphore absorbée en fonction de la teneur en gypse et du temps (coupe)

Les résultats précédents montrent que l'apport d'engrais a favorisé l'absorption de P par la plante ce qui est montré par la figure suivante :

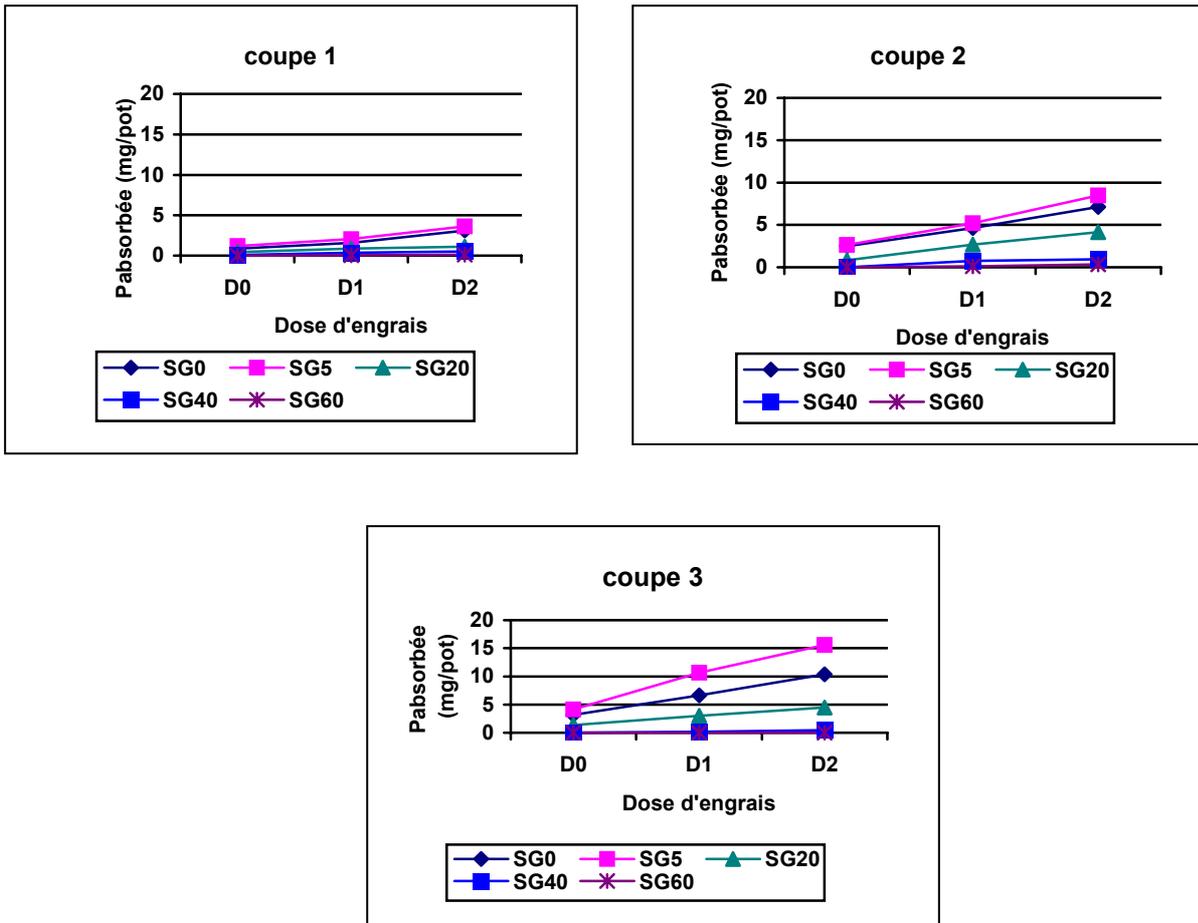


Figure II-29: Evolution de la quantité moyenne du phosphore absorbée en fonction de la teneur en gypse et de la dose d'engrais

L'absorption est différenciée entre les différents traitements en fonction de la teneur en gypse et du temps, elle est continue dans le temps pour les traitements SG0D, SG5 et SG20. Pour SG40 et SG60, elle augmente à la deuxième coupe et diminue à la troisième. (Figure II-30).

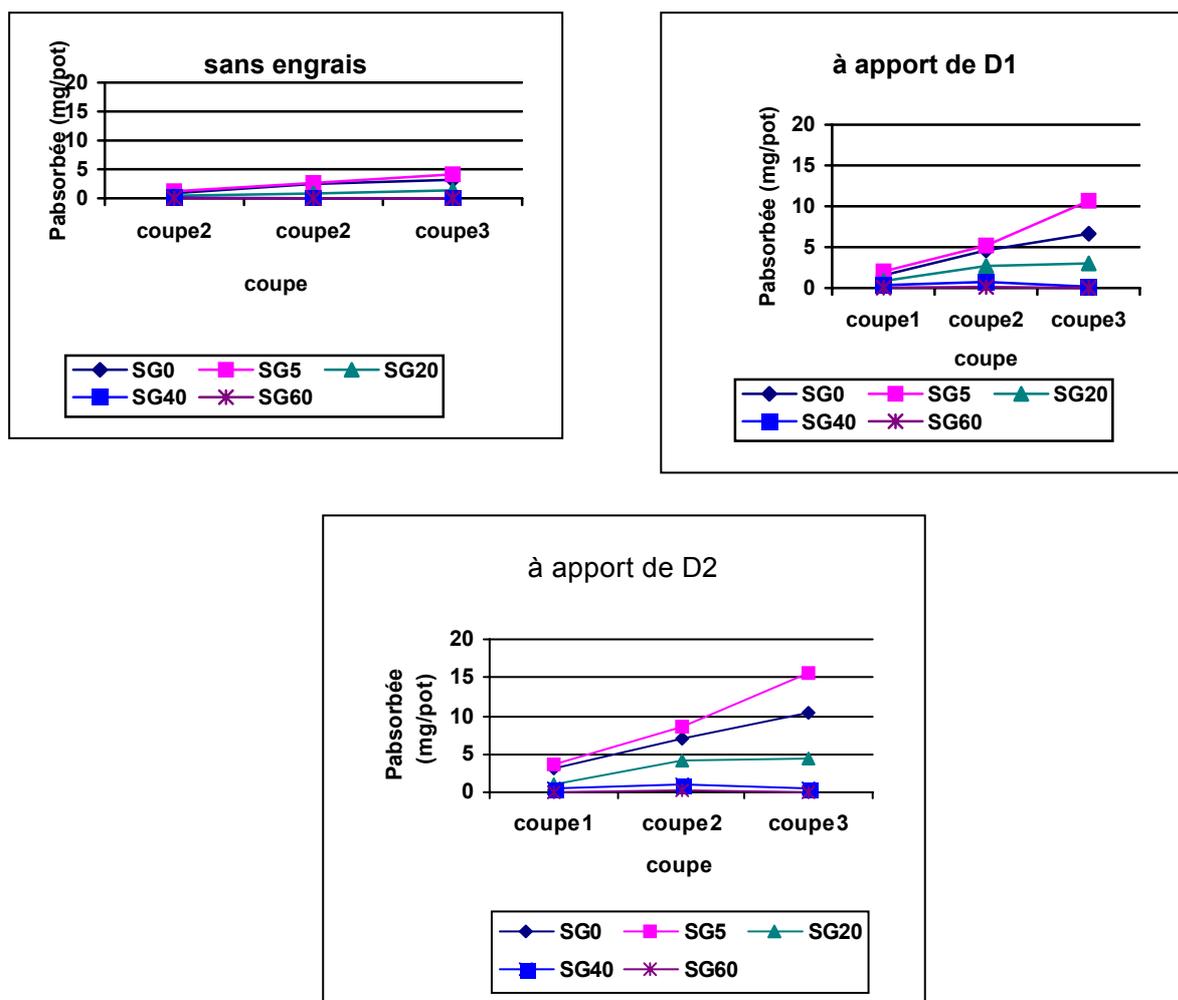


Figure II-30: Evolution de la quantité moyenne du phosphore absorbée en fonction de la teneur en gypse et du temps

Ces résultats sont étayés par les coefficients de corrélation liants l'absorption au facteur temps représentés par le tableau II-26.

Tableau II-26: Coefficients de corrélation liants les quantités du phosphore absorbé au temps

Type de corrélation	SG0-temps	SG5-temps	SG20-temps	SG40-temps	SG60-temps
D0	0.97*	0.99*	0.99*	-0.86	-0.86
D1	0.99*	0.98*	0.99*	0.09	-0.44
D2	0.99*	0.99*	0.90*	-0.21	-0.32

Ces coefficients sont positifs et significatifs pour SG0D, SG5 et SG20, ce qui montre que l'absorption est continue dans le temps, alors que pour SG40 et SG60, ils sont négatifs et non significatifs, car l'absorption diminue ou s'annule à la troisième coupe.

2.2.1.2 Influence de gypse sur les taux de prélèvement du phosphore par la plante:

La variation des quantités de P absorbées est montrée encore par la détermination de taux de prélèvement. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau II-27: Taux de prélèvement du phosphore des différents traitements

Dose d'engrais	Dose d'engrais	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
D0	21j	13.47	14.97	17.06	100	100
	36j	37.94	32.95	31.53	0	0
	51j	48.58	52.06	51.41	0	0
D1	21j	12.21	11.45	13.186	27.63	30.86
	36j	36.03	28.97	41.10	60.52	69.13
	51j	51.75	59.56	45.78	11.84	0
D2	21j	15.13	13.30	11.47	27.19	24.66
	36j	34.52	30.57	42.45	50.20	75.33
	51j	50.34	56.37	46.07	22.59	0

Ces résultats permettent de montrer que pour les traitements SG0, SG5 et SG20, les taux de prélèvement du phosphore, augmentent à la 2^{ème} coupe et augmentent faiblement à la 3^{ème}. Pour les traitements SG40 et SG60, les taux de prélèvement augmentent à la 2^{ème} coupe et diminuent à la 3^{ème}. Pour SG60D0 et SG60D1, le maximum des prélèvements est enregistré à la 1^{ère} coupe, et pour SG60D2, le taux augmente à la 2^{ème} coupe et diminue à la 3^{ème}.

2.2.1.3 Effet du gypse sur la cinétique d'absorption du phosphore

Selon Triboi (1988), la cinétique d'absorption du phosphore est exprimée sous forme d'absorption moyenne et calculée à partir de la masse et de la teneur en phosphore des coupes successives, ces dernières sont rapportées à la durée de la croissance. Pour notre cas l'absorption du phosphore est déterminée à chaque coupe est rapportée à 21, 15 et 15 jours respectivement, pour les coupes 1, 2 et 3. Ils sont estimés en $\mu\text{g}\backslash\text{j}$ (voire annexe tableau 10).

Les résultats évoluent en fonction du taux de gypse de la même manière que pour ceux des quantités du phosphore absorbé, pour les trois coupes et les trois doses d'engrais apporté. La vitesse d'absorption de P la plus élevée est notée toujours pour SG5 suivi du SG0, ensuite de SG20, puis du SG40 et à la fin du SG60 (figure II-32, 33 et 34).

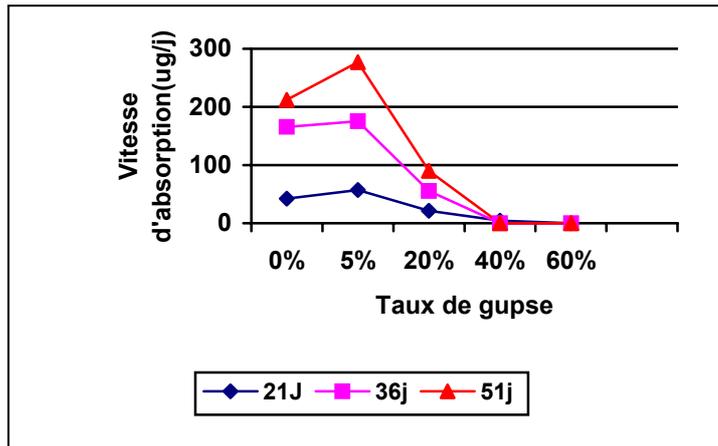


Figure II-31 : Evolution de la vitesse d'absorption du phosphore en fonction de la teneur en gypse et du temps pour les traitements sans apport d'engrais

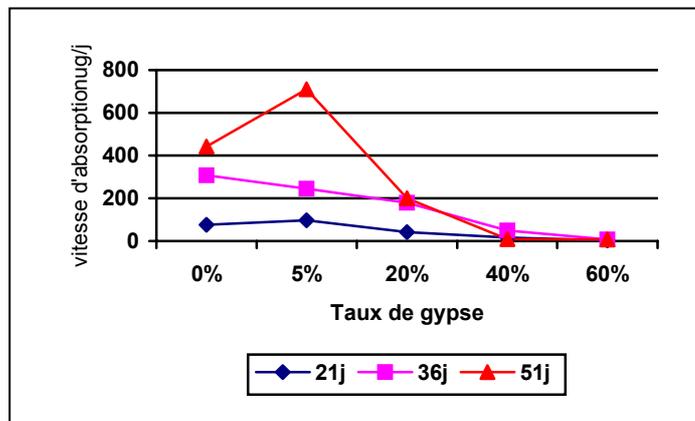


Figure II-32 : Evolution de la vitesse d'absorption du phosphore en fonction de la teneur en gypse après apport de la dose d'engrais D1

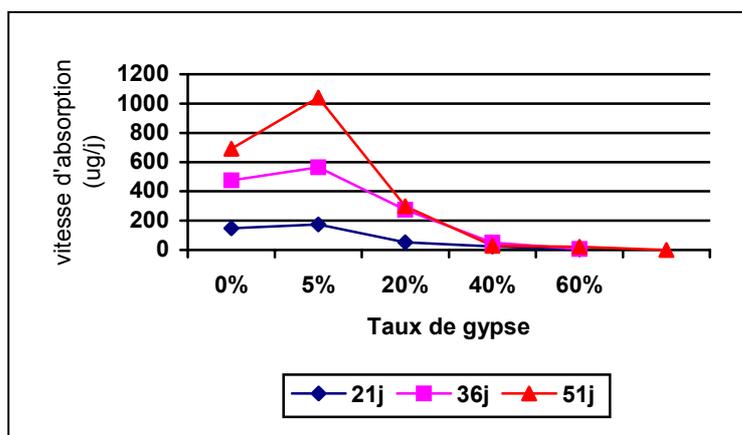


Figure II-33 : Evolution de la vitesse d'absorption du phosphore en fonction de la teneur en gypse et de la dose d'engrais D2

La vitesse d'absorption quotidienne augmente régulièrement dans le temps pour tous les traitements à la deuxième coupe, ce qui a été montré aussi par Gachon (1988), et augmente à un rythme plus faible à la troisième coupe pour SG0 et SG5. (Figure II-34).

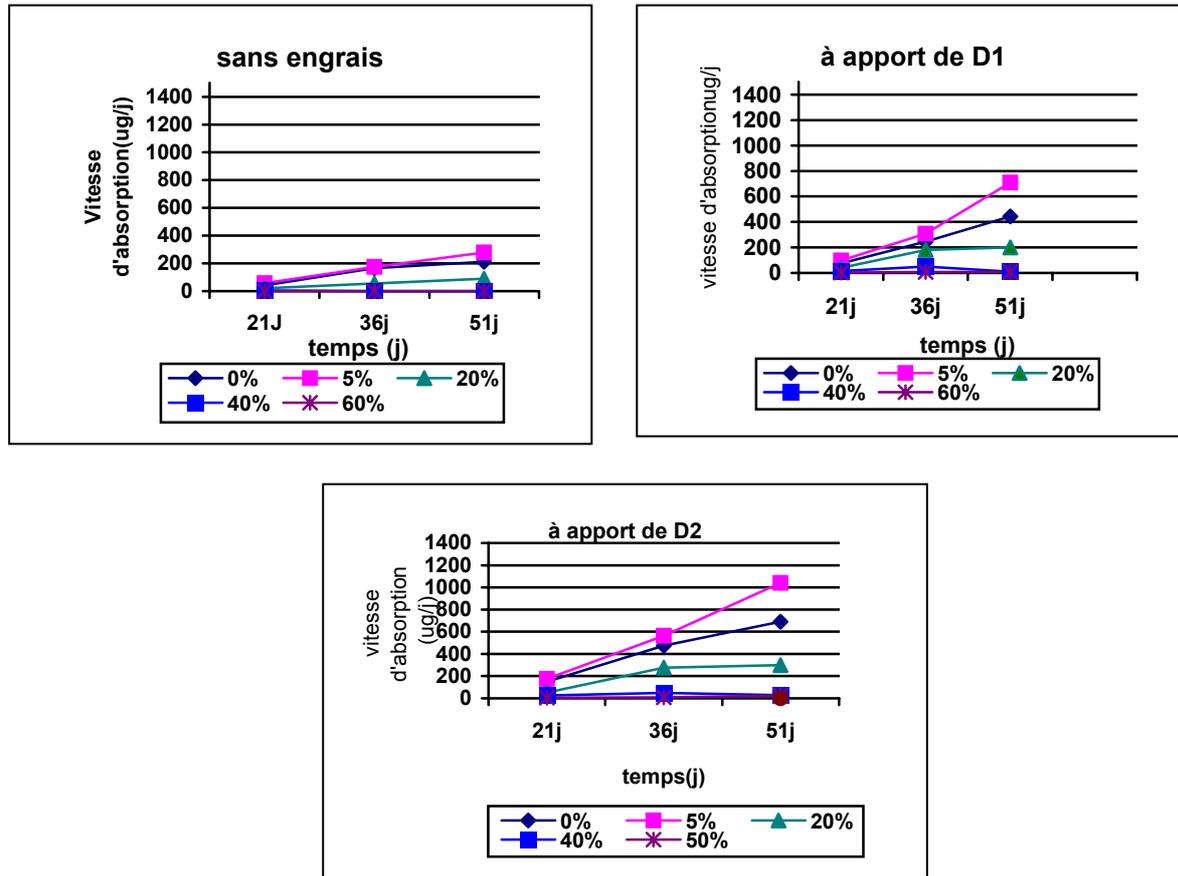


Figure II-34 : Evolution de la vitesse d'absorption du phosphore en fonction de la teneur en gypse et du temps

Pour les traitements SG5D1 et SG5D2, La vitesse d'absorption du phosphore augmente remarquablement même à la troisième coupe ce qui prouve que l'apport d'engrais au sol à 5% de gypse à un effet favorable sur les quantités de P absorbé par la plante, qui donne un résultats meilleur que celui du SG0 même avec apport d'engrais à ce traitement.

La vitesse d'absorption diminue pour les traitements SG40 et SG60 même avec apport d'engrais et augmente remarquablement avec l'apport d'engrais ce qui est montré par la figure II-35.

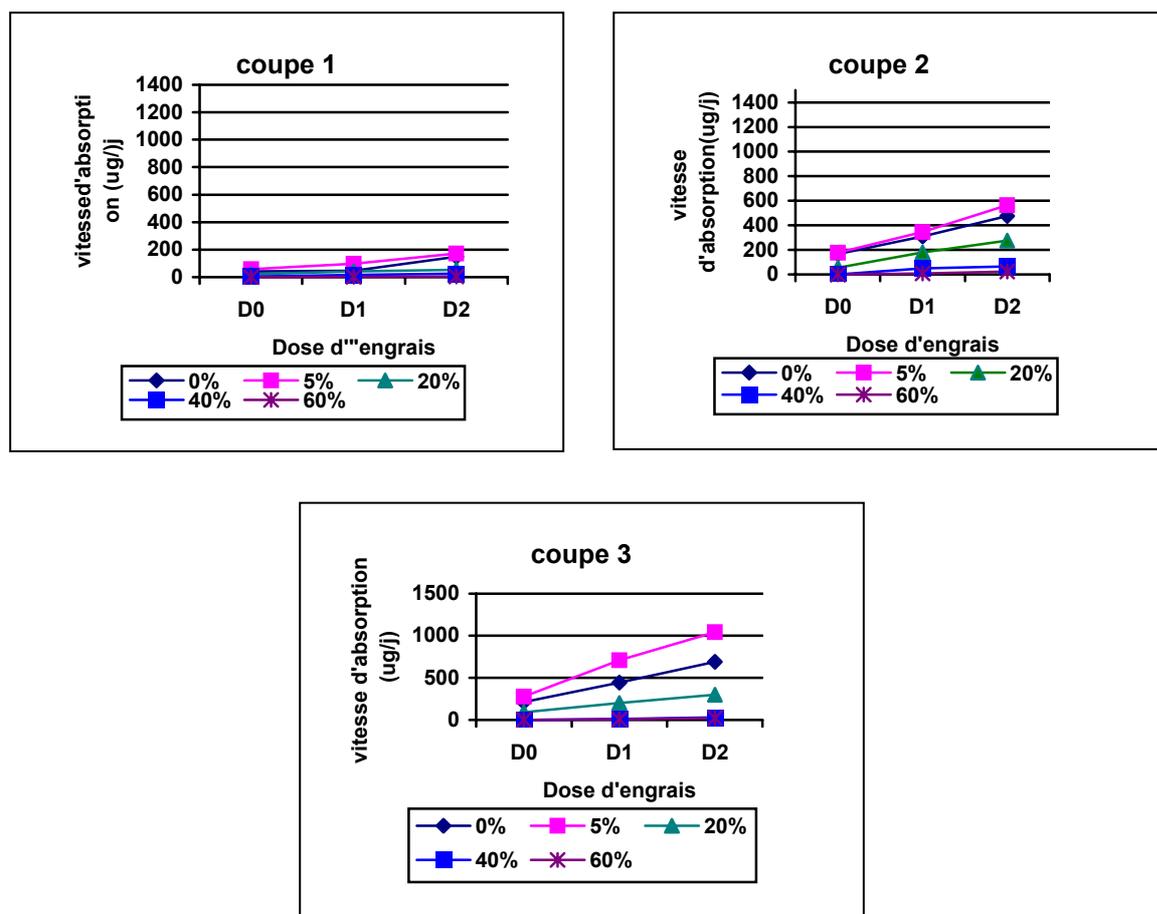


Figure II-35 : Evolution de la vitesse d'absorption du phosphore en fonction de la teneur en gypse et de la dose d'engrais

Ces résultats sont montrés par les coefficients de corrélation liants la teneur en gypse et l'apport de l'engrais et la vitesse de croissance et d'absorption du phosphore qui sont résumés dans les tableaux suivants :

Tableau II-28 : Coefficients de corrélation liant la vitesse d'absorption du phosphore à la teneur en gypse

Type de corrélation	A 21 jours	A 36 jours	A 51 jours
Gypse-D0	-0.91*	-0.91*	-0.91*
Gypse-D1	-0.93*	-0.96*	-0.86*
Gypse-D2	-0.91*	-0.94*	-0.87*

* = corrélation significatif (P<0.05)

Tableau II-29 : Coefficients de corrélation liant la vitesse d'absorption du phosphore à la dose d'engrais

	SG0-engrais	SG5-engrais	SG20-engrais	SG40-engrais	SG60-engrais
A 21 jours	0.97*	0.98*	0.99*	0.99*	0.99*
A36 jours	0.99*	0.99*	0.99*	0.86*	0.86*
A 51 jours	0.99*	0.99*	0.99*	0.89*	0.86*

Tableau II-30 : Coefficients de corrélation liant la vitesse d'absorption du phosphore au temps

	SG0-temps	SG5-temps	SG20-temps	SG40-temps	SG60-temps
D0	0.96*	0.99*	0.98*	-0.86	-0.86
D1	0.98*	0.99*	0.91*	-0.17	-0.31
D2	0.99*	0.99*	0.90*	-0.03	-0.68

* = Coefficients de corrélation significatifs ($P < 0.05$)

Ces coefficients sont significatifs pour les traitements SG0, SG5, SG2 à D0, D1 et D2 et SG40 à D1 et D2 et sont non significatifs pour SG40D0 et SG60 à D0, D1 et D2, car la vitesse d'absorption diminue en fonction du temps ou devient nulle pour ces traitements.

2.2.1.4 Influence du gypse sur l'absorption totale du phosphore par le ray-grass

L'absorption totale du phosphore par la plante est différenciée entre les traitements, en fonction du taux de gypse et la dose d'engrais apporté, pour les trois coupes. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau II-31.

Tableau II-31 : Quantités totales prélevées de phosphore en mg\pot par les plantes

	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
D0	6.546	7.986	2.626	0.096	0.002
D1	12.822	17.876	6.552	1.216	0.162
D2	20.594	27.679	9.728	1.912	0.446

Sans apport d'engrais ; L'absorption totale du phosphore varie en fonction de la teneur en gypse. Le traitement SG5 a présenté le meilleur résultat avec l'absorption de 7.986mg\pot de P, suivit du SG0 puis il y a une nette diminution en fonction du taux de gypse. Pour SG60D0, l'absorption du phosphore est de 0.002mg\pot. (Figure II-36)

Avec apport de D1 d'engrais ; L'absorption du phosphore est plus élevée avec apport de dose de 250ppm que sans apport d'engrais (en comparant chaque traitement sans engrais au

traitement correspondant avec apport d'engrais). Pour SG5D1, il y a l'absorption de 17.876mg\pot de P, suivit du SG0D1, l'absorption diminue graduellement avec le taux de gypse pour être de 0.162 mg\pot de P qui est très faibles pour SG60D1.

Après apport de D2 d'engrais ; L'apport de 500ppm a favoriser l'absorption du P encore plus que pour les traitements avec apport de D1.

L'absorption est toujours plus élevée pour SG5D2, elle est de 27.697mg\pot de P absorbé, suivit du traitement sans gypse SG0D2, et respectivement des traitements SG20, SG40 et SG60D2, ce dernier présente l'absorption de 0.446mg\pot de P.

Les sols à 5% de gypse présentent les meilleurs résultats, à l'exception de ces sols, l'absorption totale diminue en fonction de la quantité du gypse apportée.

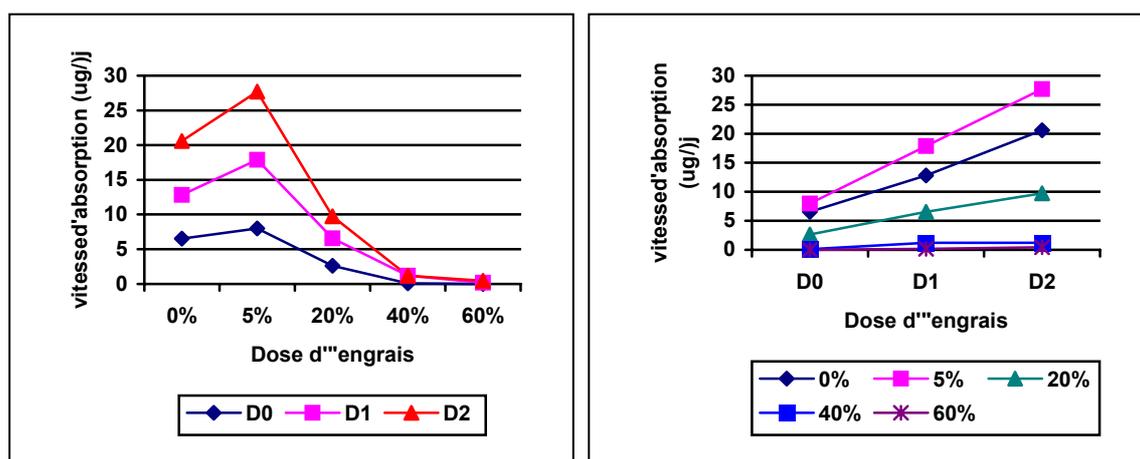


Figure II-36 : influence du gypse sur l'absorption totale du phosphore en fonction de la dose d'engrais apportée

➤ Influence du gypse sur l'absorption du phosphore par la plante

Pour montrer cet effet, l'analyse de la variance à été effectuée, une différence très hautement significative entre les différents traitements. (Voire tableaux 24, 25 et 26, annexe). Le test de Newman et keuls classe de la même manière les traitements à même apport d'engrais, omme suit ; du moins en moins faible absorption :

SG5>SG0>SG20>SG40>SG60 P<0.05.

Tableau II-32 : Classement en groupes homogènes des traitements (le même pour les trois doses d'engrais) pour la quantité du phosphore total absorbé (test à 5%).

Traitement	Groupes
SG5	A
SG0	B
SG20	C
SG40	D
SG60	E

Le classement des traitements pour les quantités du phosphore total absorbé, montre que le traitement SG5 présente toujours le meilleur résultat suivi par le traitement SG0, ensuite SG20, puis du SG40, le traitement SG60 est classé en dernier.

Les coefficients de corrélation liants l'absorption du phosphore à la teneur en gypse sont déterminés (tableau II-33). La corrélation est négative et significative, ce qui prouve l'effet négatif du gypse sur ces deux paramètres,

Tableau II-33 : Coefficients de corrélation liants les quantités du phosphore absorbé à la teneur en gypse.

Type de corrélation	R
Gypse-D0	-0,91*
Gypse-D1	-0,90*
Gypse-D2	-0,90*

➤ **Influence de l'apport de l'engrais sur l'absorption du phosphore par la plante**

L'absorption totale moyenne du phosphore augmente en fonction de la quantité d'engrais apportée.

Les coefficients de corrélation liants la biomasse produite et la quantité absorbée de P à la quantité apportée de TSP sont calculés. Ils sont positifs et significatifs, et sont résumés dans le tableau II-34 (calculés toujours par rapport aux traitements sans apport d'engrais).

Tableau II-34 : Coefficients de corrélation liants la quantité totale moyenne du phosphore absorbé à la dose d'engrais

Type de corrélation	SG0-engrais	SG5-engrais	SG20-engrais	SG40-engrais	SG60-engrais
r	0.99*	0.99*	0.99*	0.99*	0.98*

➤ **Influence combinée du gypse et de l'engrais sur l'absorption du phosphore par la plante**

Pour déterminer ces deux effets, une analyse de la variance est effectuée, et a montré un résultat significatif. Le test de Newman et keuls permet de classer les traitement du moins en moins faible absorption les traitements sont classés comme suit

SG5D2>SG0D2, SG5D1> SG5D1,SG20D2>SG5D0, SG20D1>SG0D0 > SG20D0>SG40D2, SG40D1>SG60D2, SG40D0, SG60D1, > SG60D0.

Tableau II-35 : Classement en groupes homogènes des traitements (test à 5%) pour les quantités de P absorbé

Traitements	Groupes
SG5D2	A
SG0D2 SG5D1	B
SG0D1 SG20D2	C
SG5D0	CD
SG20D1,SG0D0	DE
SG20D0,SG40D2,SG40D1,SG60D1,SG60D2 SG40D0,	DEF
SG60D0	EF

Pour les quantités totales absorbées de P, le SG5D2 présente toujours les meilleurs résultats suivit du SG0D2 qui est classé avec le SG5D1, le traitement SG20D2 est classé avec le SG0D1, donc l'apport de 500ppm de TSP à un sol à 20% de gypse a donné un effet favorable sur l'absorption du phosphore même par rapport au traitement sans gypse et avec apport de 250ppm.

Les traitements SG40D2, SG40D1 et SG60D2 sont classés dans le même groupe avec SG20D0 et SG60D2, ce qui signifie que l'apport même d'engrais n'a pas montré un effet favorable sur les quantité du phosphore absorbé dans un son à 40% de gypse

Ce classement permet de tirer les mêmes remarques avancées pour la matière sèche totales produite, ainsi, le traitement SG5D2 a montré les meilleurs résultats, l'apport de la dose D2 à SG20 a donné un résultat meilleur que celui du SG0D0 et SG5D0, donc les sols à 20% de gypse nécessitent l'apport d'engrais pour être cultivé. L'apport d'engrais même à forte dose à SG40 et SG60 donne toujours de faible résultats (fiable matière sèche produite et absorption du P) par rapport à SG20 même sans apport d'engrais et peuvent être par voie de conséquence non rentable économiquement.

Une équation de régression multiple, liant les quantités de P prélevées par la plante, à la teneur en gypse et à la dose d'engrais, est établie comme suit :

$$P \text{ prélevé(mg}\backslash\text{pot)} = 6,64861 - 0,159714\text{gypse(\%)} + 0,007792\text{engrais(ppm)}.$$
$$r^2 = 78,5523 \%$$

Cette équation permet la prédiction des quantités de P que la plante peut prélever en fonction du taux de gypse présent dans le sol pour la plante.

2.2.2 Discussion

Effet de la teneur de 5% de gypse sur les quantités de P absorbé ;

A 5% de gypse, l'interception racinaire du flux potentiel du phosphore offert par le sol est élevé par rapport à celui du sol sans gypse, ce ci est montré par le fait qu'à faible teneur en gypse, la plante présente une meilleure absorption du phosphore, donc une meilleur utilisation des quantités présent dans le sol, même si elle ne sont pas importantes. L'intensité de l'alimentation phosphatée est liée à l'interception de cette offre par les racines, qui a été signalée par Gachon et Triboi (1988). Ainsi, les facteurs physiques du milieu modifient considérablement les processus de transfert et d'interception racinaire, révélé par les mêmes auteurs. Les caractéristiques physiques du sol sont améliorées par l'apport de 5% de gypse, ce dernier a favorisé par exemple la densité et l'aération du sol. Le prélèvement du phosphore par la plante été influencée par sa disponibilité, la teneur en eau, l'aération et la continuité des pores dans la rhizosphère (Zheng et al, 2003). Selon FAO (1990) l'apport de gypse peut avoir deux effets opposés sur la solubilité et la disponibilité du phosphore, d'un coté il diminue le pH, ce qui favorise la solubilité, et d'un autre coté augmente l'activité de Ca^{2+} qui précipite le phosphore. Un sol n'est dit gypseux pour FAO (1998) que si la teneur en gypse est supérieure à 5%, donc cette teneur peut ne pas avoir de conséquences négatives sur les caractéristiques du sol et sur l'absorption du phosphore.

Effet des teneurs élevés de gypse sur les quantités de P absorbé ;

Les quantités de P absorbées sont inversement proportionnelles aux teneurs du sol en gypse, le phosphore contenu dans la plante diminue, ce ci est dû à l'insolubilisation de cet élément par le gypse. Cette insolubilisation été montrée auparavant par l'étude de la dynamique de cet élément dans les différents traitements, la quantité des $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$ diminuent.

le phosphore est précipité sous formes insolubles après sa réaction avec les Ca^{2+} du complexe adsorbant qui est devenu plus saturé avec ces cations, et des Ca^{2+} dissout dans la solution du sol et provenant de la solubilité du gypse et par son adsorption sur la surface de ce dernier. Cette insolubilité est de plus importante que la quantité du gypse soit élevée dans le sol. Aussi, les plantes se trouvent en condition de stress salin, ce qui limite ses prélèvements en phosphore suite à l'augmentation de la pression osmotique (Hamdy et Makhoulf, 2000). Il faut signaler que la plante se trouve dans des conditions de stress salin, la pression osmotique est élevée, ce qui réduit l'absorption de l'eau et des faibles quantités de phosphore assimilable existant dans le sol.

Aussi, il est important de mentionner que les sols à teneurs élevées en gypse présentent un pouvoir fixateur élevé vis à vis du phosphore, ce qui conduit à la forte rétention des quantités du phosphore apporté. Gachon (1988) montre que le pouvoir tampon du sol contrôle l'offre potentiel de ce dernier, le sol doit posséder des réserves labiles en phosphore d'autant plus fortes que les ions phosphates sont soumis à une plus grande énergie de fixation.

2.3 Influence du gypse sur la partie racinaire

Les résultats de la matière sèche racinaire produite, la quantité de phosphore cumulé et de la longueur des racines, sont résumés dans les tableaux II-36,37 et 38.

Tableau II-36 : Matière sèche produite en gramme par les racines

	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
D0	0.54	0.81	0.43	0.33	0.11
D1	1.2	1.5	0.48	0.4	0.2
D2	2.4	3.81	0.59	0.45	0.25

Tableau II-37 : Quantité du phosphore en mg\pot de sol cumulé par les racines

	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
D0	0.594	0.972	0.395	0.152	0.0023
D1	2.04	2.88	0.72	0.36	0.0084
D2	4.8	7.62	1.062	0.637	0.237

Tableau II-38 : Longueur des racines en cm

	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
D0	5	5.5	2.3	1.8	1.3
D1	5.2	6.5	3.1	2	1.5
D2	6	8	5.4	4.2	3

Sous l'influence du gypse, les résultats liés à la partie racinaire évoluent d'une façon analogue à ceux de la partie aérienne, avec et sans apport d'engrais.

Sans apport d'engrais : Le traitement SG5D0 présente les meilleurs résultats, qui sont de 0.81g de matière sèche, 0.972mg\pot\pot de P absorbé et 5.5 cm de longueur des racines, suivit du traitement SG0D0, puis SG20D0, ensuite SG40D0, et à la fin SG60D0 présentant les plus faibles résultats ; 0.11g de matière sèche, 0.0023mg\pot de P absorbé et 1.3cm de longueur.

Avec apport de D1 : Toujours le traitement SG5D1 présente les meilleurs résultats qui sont de 1.5g de matière sèche, 2.88mg\pot de P absorbé et 6.5cm de longueur. Le traitement sg60d1, présente les plus faibles résultats, de 0.2g de matière sèche, absorption de 0.0084mg\pot de P et une longueur de 1.5cm.

Avec apport de D2 : Le traitement SG5D2 présente les résultats maximums, avec la production de 1.5g de biomasse, l'absorption de 7.62mg\pot de P et une longueur de 8cm. Les résultats les plus faibles sont marqués pour SG60D1, production de 0.25gdde matière sèche, absorption de 0.237g\kg de P et longueur de 3cm. les valeurs les plus faibles sont notés pour SG60D2 à 0.25g de matière sèche, 0.25mg\pot de P absorbé et 3cm de longueur.(figure II 38, 38 et 39).

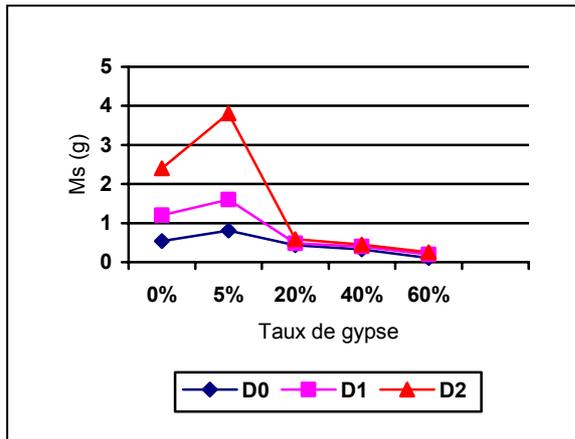


Figure II-37 : Evolution de la quantité de la matière sèche racinaire en fonction de la dose d'engrais apportée et de la teneur en gypse

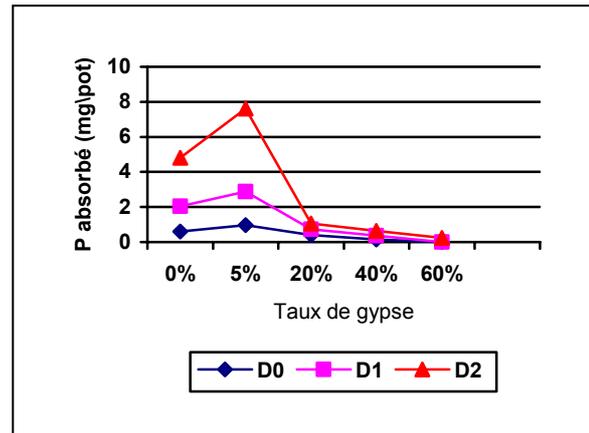


Figure II-38 : Evolution de l'absorption du phosphore par les racines en fonction de la dose d'engrais apportée et de la teneur en gypse

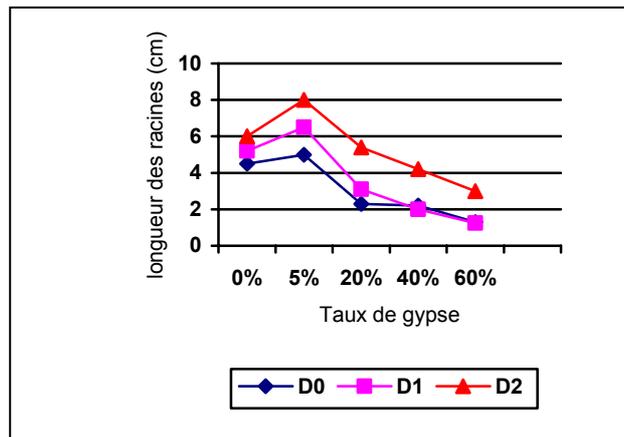


Figure II-39: Evolution de La longueur des racines en fonction de la dose d'engrais apportée et de la teneur en gypse

L'effet du gypse et de la quantité de l'engrais apporté sur les différents paramètres racinaire est déterminé en calculant les coefficients de corrélation.

➤ Effet du gypse

Les coefficients de corrélation liants la matière sèche produite, l'absorption du phosphore et les longueurs des racines à la quantité du gypse, sont négatifs et significatifs. (tableau II-39).

Tableau II-39 Coefficients de corrélation liants la matière sèche racinaire moyenne, les quantités moyennes de P accumulées dans les racines et les longueurs moyennes des racines à la teneur en gypse

	Gypse-D0	Gypse-D1	Gypse-D2
Ms racinaire	-0.89*	-0.87*	-0.90*
Absorption de P	-0.88*	-0.87*	-0.80*
Longueur des racines	-0.90*	-0.90*	-0.89*

➤ **Influence de l'apport de l'engrais**

Les coefficients de corrélation liants les quantités de matière sèche produites, du phosphore absorbé, de la longueur des racines à la dose d'engrais, sont positifs et significatifs ce qui montre l'effet positif de l'apport de l'engrais sur ces paramètres.

Tableau II-40 :Coefficients de corrélation liant la matière sèche racinaire moyenne, les quantités moyennes de P accumulées dans les racines et les longueurs moyenne des racines à la dose d'engrais apportée.

	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
Ms racinaire	0.98*	0.95	0.97*	0.99*	0.98*
Absorption de P	0.98*	0.97*	0.99*	0.99*	0.87*
Longueur des racines	0.94	0.99*	0.96*	0.90*	0.91*

* = corrélation significative à (P<5%).

La limitation de la croissance racinaire à forte teneurs en gypse peut être due à la diminution de la disponibilité du phosphore dans le sol, Selon Hue et al (1997), la déficience en phosphore diminue l'extension racinaire. Toutefois, Mollier (1999) a étudié au champ à 3 niveaux d'offre en P et en hydroponie, l'effet d'une déficience en cet élément sur la construction de l'arborescence racinaire du maïs (*Zea mays* L.), il montre la que l'effet d'une déficience en P agit sur le développement aérien et racinaire du maïs. Une déficience en P réduit très tôt et très fortement la croissance foliaire. La réduction d'accumulation de biomasse totale par plante (aérienne et racinaire) est principalement expliquée par cette réduction de surface foliaire. La croissance racinaire est limitée par la disponibilité en assimilés carbonés. L'interprétation générale proposée est qu'une déficience en P affecterait la croissance et la morphogénèse racinaire uniquement via son effet sur la croissance foliaire et ses

conséquences sur l'assimilation et la répartition du carbone dans la plante. Il n'y aurait pas, dans la gamme de déficience explorée, d'autre effet direct ou spécifique de la déficience en P sur les processus d'organogenèse racinaire.

L'effet premier de la salinité se produit dans les racines ou ce produit un déficit hydrique et une toxicité spécifique, la plante répons par une réduction de la croissance

L'excès de sels dans la rhizosphère touche tout les processus de croissance des plantes, tel que l'élongation et la division cellulaires, et un endommagement de la croissance de ces dernières par accumulation de taux élevés d'ions toxiques, réduit la photosynthèse et la phosphorylation oxydative, conduit à la dépression de l'activité enzymatique spécifique, limite la formation des métabolites essentiels et par conséquence la synthèse des carbohydrates, des protéines et des acides nucléiques ce qui est mentionné par Munns et al (1986) in Hamdy et Makhlouf (2002).

Le stress salin conduit à la réduction de la croissance racinaire et par conséquence, la réduction du transport des éléments nutritifs vers la partie aérienne ce qui réduit la biomasse produite (Waisel, 1972 in Hamdy et Makhlouf, 2000).

De forte corrélation sont observées entre la matière sèche aérienne produite par la plante et celle ses racines ($r = 0.72^*$, $P < 5\%$), ainsi que la quantité de P absorbée et celles des parties racinaires ($r = 0.82^*$, $P < 5\%$), ce qui a été prouvé par Guivarche (2001) sur cette même plante, les corrélations sont positives et significatives.

3. Relation entre la réponse à de la plante et le flux du phosphore dans le sol

Il existe une nette relation entre la croissance de la plante et les quantité de P absorbé, le coefficient de corrélation liant ces deux paramètres est significatif ($r = 0.96^*$). La quantité du phosphore absorbé dépend largement du flux de cet élément dans la solution du sol.

La déficience en phosphore fait diminuer la biomasse des plantes, la surface foliaire est réduite, la culture présente une faible production Colomb (2001) a montré la diminution de la biomasse produite lorsque la teneur en phosphore assimilable dans le sol est faible.

La diminution du phosphore assimilable conduit à la réduction de la matière sèche (la photosynthèse est faible). En présence de fortes teneurs en gypse, la coloration vert foncée des feuilles et la réduction de la surface foliaire sont observés et qui sont mes signes de carence phosphatée ce qui est montré par Colomb et al (2000) et d'un stress salin montré par Hamdy et Makhlouf (2000).

Le phosphore jouant un rôle physiologique majeur dans la synthèse de l'ARN et par conséquent dans la synthèse des protéines et des lipides. la plupart du phosphore se présente chez les plantes sous forme de phosphates minéraux localisés dans les vacuoles cellulaires, des expériences de Bielsky (1968) ont mis en évidence que la croissance a été arrêtée aussitôt que la réserve vacuolaire était épuisée (Gachon et Triboi, 1988).

Guivarche (2001) signale que la modification de l'offre du phosphore et d'autres éléments son susceptibles de modifier la croissance de la plante, ce qui a par conséquence de modifier la demande en phosphore et sa croissance racinaire, ce ci est due au changement de sa capacité d'intercepter l'offre en phosphore (Mollier et Pellerin (2000) in Guivarche (2001).

L'apport de l'engrais améliore la quantité de la matière sèche produite et augmente les quantités de phosphore absorbées par la plante du ray-grass ce même résultat été confirmé par Copponet (1988) , Al-Abbas et Berber (1964), Simard et Sentram (1993), l'équation de régression est linéaire et significative, même résultat a été trouvé sur culture de blé par Sander et al (1991) ; Yang et al (1990) ; Menou et al (1991), aussi Copponet (1988) a montré qu'il existe une corrélation positive et significative entre la teneur en phosphore assimilable du sol et celle du ray-grass d'Italie, Snyder et Thompson (1999) ont montré que la production en ray-grass été doublée suite à l'apport d'un engrais phosphaté (de 2.3t\ha à 4.6t\ha). Aussi Zheng et al (2003) qui a montré qu'il existe une relation linéaire entre la quantité du phosphore disponible dans le sol et les

quantités prélevées par le végétal, la croissance augmente aussi en fonction de la dose d'engrais mais sans dépasser le seuil de toxicité (Mackenzie et al, 2003). Comme il a été observé que le sol à 20% de gypse peut donner de bons résultats après fertilisation, alors qu'à des teneurs élevées en gypse la plante souffre et dépérit même avec apport d'engrais. Il faut mentionner que l'apport d'engrais accroît la teneur de la plante en P, ce qui a été confirmé par Copponet (1988) qui montre aussi, qu'il y a une très bonne corrélation entre la teneur du sol en phosphore et celle de la plante

La disponibilité du phosphore diminue avec le temps qui suit l'apport de l'engrais. En effet, il existe une relation entre le phosphore absorbé par la plante et la biomasse synthétisée ce qui a été montré par Gachon (1988), cela explique la diminution des quantités du phosphore absorbé par la plante à fortes teneurs en gypse et le dépérissement de la plante.

Aussi, le flux de phosphore absorbé augmente dans le temps lorsque le phosphore est présent dans le sol, cas des traitements SG0, SG5 et SG20 avec apport d'engrais. Ce flux diminue lorsque il y a une faible teneur de phosphore dans le sol et s'anéantit lorsque il n'y a plus de phosphore, cas des sols à 40 et 60% de gypse. Ce résultat est confirmé par Gachon et Triboi (1988) qui affirment que les quantités du phosphore absorbés augmentent dans le temps au cours du premier cycle à un rythme qui se ralentit d'autant plus que l'épuisement antérieur a été prononcé. Dans notre cas c'est la diminution du phosphore assimilable due à son blocage par le gypse.

L'ensemble des expériences réalisées par Etchebest (2000) sur le maïs confirme qu'une déficience en P réduit la croissance foliaire. La réduction de la surface foliaire résulte à la fois d'un retard d'apparition des feuilles et d'une réduction de leurs dimensions finales (longueur et largeur). L'analyse de la vitesse d'allongement foliaire par le même auteur avec un pas de temps bi-journalier a montré qu'une déficience en P réduit la vitesse d'allongement foliaire permise par le climat, de façon similaire pour l'ensemble des feuilles en croissance simultanément. Cette réduction de la vitesse d'allongement foliaire provient à la fois d'une zone de croissance plus courte et d'une diminution des taux d'allongement relatifs élémentaires dans la zone de croissance. Ces résultats renforcent l'hypothèse d'un effet local direct du P sur le fonctionnement du méristème foliaire. Une relation stable, commune aux différentes expériences, a été mise en évidence entre la vitesse d'allongement foliaire et la teneur en P dans la zone de croissance. La teneur en P dans les zones de croissance étant très

liée à la teneur en P la plante, une relation prédictive a également été mise en évidence entre la vitesse d'allongement foliaire et la teneur en P dans la plante.

4. Etude comparative des deux méthodes d'extraction du phosphore assimilable

Les deux méthodes d'analyse du phosphore assimilable Joret-Hebert et Olsen ont donné des résultats de la même évolution (figure II-39). Cependant, les quantités extraites diffèrent significativement entre les deux méthodes. La méthode Joret-Hebert extrait des quantités plus importantes de phosphore assimilable, elle utilise l'oxalate d'ammonium qui est un réactif plus agressif que le bicarbonate de sodium utilisé par la méthode Olsen, donc extrait des quantités supérieures de P assimilable, et extrait même les formes insolubles.

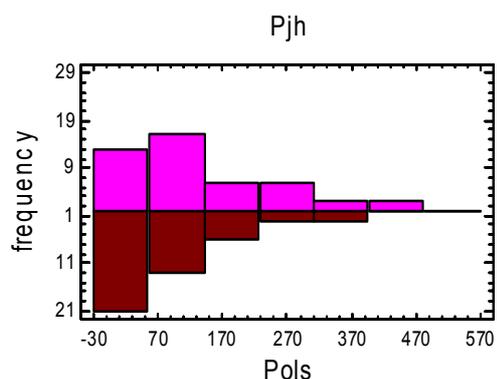


Figure II-40 : Comparaison des deux méthodes d'analyse (Joret-Herbert et Olsen)

Les valeurs du Pjh, varient de 0 à 450ppm et celle du Pols de 0 à 370ppm

	Pjh	Pols
Moyenne	132,904	94,1433
Minimum	0,0	0,0
Maximum	450,0	370,0

Pour déterminer la meilleure méthode d'analyse, les résultats du test chimique sont confrontés ceux avec du test biologique

Les coefficients de régression multiples entre le phosphore assimilable Joret –Hebert et le phosphore assimilable Olsen et les quantités du phosphore absorbé par la plante, sont déterminées.

Ils sont calculés dans le but de déterminer l'effet de la teneur du sol en phosphore sur l'absorption de cet élément par la plante et de déterminer la méthode d'extraction du phosphore assimilable donnant les résultats les plus corrélés avec ceux du test biologique.

Ces résultats montrent que la quantité du phosphore absorbé est liée à la quantité du phosphore assimilable dans le sol et donc à la teneur en gypse de ce dernier. La méthode joret-Hebert surestime la quantité du phosphore disponible à la plante alors que la méthode Olsen indique des teneurs en phosphore assimilables qui sont plus faibles que celle de la méthode Joret-Hebert et sont en accord avec les quantités absorbées par la plante, le coefficient de régression r^2 est de 0.89.

Ces résultats sont confirmés par d'autres auteurs qui préconisent la méthode Olsen pour extraire le phosphore assimilable, dont ; Fardeau et al (1988) ; Esilaba et al (1992) ; JAe Jacobsen (1990) ; Vilain (1997).

En effet, la méthode Joret -Hebert extrait à l'oxalate d'ammonium le phosphore, c'est une extraction agressive. La méthode Olsen s'avère satisfaisante sur toutes les catégories de sol, le bicarbonate de sodium est un extractif à faible agressivité vis à vis des phosphates calciques. Le phosphore extrait par la méthode Olsen est d'une nature plus voisine du phosphore isotopiquement échangeable et donne des informations qui sont les plus corrélés avec les données biologiques (Fardeau et al, 1988). Mais la méthode Joret-Hebert reste toujours la plus utilisée en pratique car elle nécessite moins de produit chimique avec moins de prix que celle d'Olsen.

Tableau II-41 : Coefficients de régression multiples liants la réponse de la plante aux teneurs du sol en Pjh et Pols.

Type de régression	R ²
Matière sèche-Pols	85.72%
Matière sèche-Pjh	80.73%
Prélèvement de P-Pols	89.55%
Prélèvement de P-Pjh	83.63%
Matière sèche-gypse-Pols	93.22%
Matière sèche-gypse-Pjh	93.29%
Prélèvement de P-gypse-Pols	92.80%
Prélèvement de P-gypse-Pjh	91.17%
Matière sèche-Pprelevé	96.92%
Matière sèche-matière sèche racinaire	72.02%
Prélevement de P-Pprelevé par les racines	82.57%
Matière sèche-Pprelevé par les racines	71.89%

Conclusion

La présence de gypse dans le sol influe sur l'absorption du phosphore par la plante et par conséquent sur la quantité de biomasse produite. Cette influence dépend de la quantité de cet élément dans le sol. Cependant, les faibles teneurs en gypse ont un effet favorable sur la plante. A teneur moyenne en gypse, la plante ne présente une bonne repense qu'après fertilisation. A teneurs élevées, la plante souffre et dépérit même avec apport de forte dose d'engrais. Le gypse agit par le blocage du phosphore labile présent dans le sol, et l'augmentation de la pression osmotique de la solution du sol. La plante se trouve dans un état de stress salin et donc un stress hydrique.

La confrontation des résultats du test biologique aux teneurs en phosphore assimilable a montré une bonne corrélation entre le phosphore Olsen et le phosphore absorbé par la plante.

Conclusion
générale

Conclusion générale

L'étude de l'influence de gypse, à des teneurs croissantes sur la dynamique du phosphore dans le sol et sa cinétique d'absorption par le ray-grass a permis de faire ressortir les conclusions suivantes :

Pour la dynamique du phosphore dans le sol ; tous les traitements étudiés présentent un pouvoir fixateur vis à vis du phosphore qui augmente avec la teneur en gypse ;

Le sol sans gypse peut fixer des quantités élevées de phosphore, car il présente des conditions favorables sa rétention (pH basique, et complexe absorbant riche en Ca^{2+}). Ce pouvoir fixateur augmente proportionnellement avec la teneur en gypse. Suite à solubilité, ce dernier sature le complexe absorbant en Ca^{2+} , apporte du Ca^{2+} à la solution du sol, ces cations forment avec le phosphore des composés insolubles. Le gypse adsorbe à sa surface les ions phosphoriques. Ces processus sont de plus en plus importants que le taux de gypse apporté soit élevé.

Sans apport d'engrais, la quantité de phosphore assimilable dans le sol diminue en fonction du temps pour tous les traitements.

Pour le sol sans gypse, la diminution s'explique par l'immobilisation du phosphore par sa réaction avec les Ca^{2+} après irrigation.

Pour le sol à 5% de gypse, la diminution est plus importante et peut s'expliquer par les Ca^{2+} existant dans le sol, et probablement par la réaction avec les Ca^{2+} en surplus apportés par le gypse.

Pour les traitements à 20, 40 et 60% de gypse par l'insolubilisation du phosphore par le gypse (réaction avec le Ca^{2+} provenant de la solubilisation du gypse, et son adsorption sur ses particules). Plus la quantité de gypse est élevée plus il y a du Ca^{2+} dans le sol et l'insolubilisation est plus importante.

Avec apport d'engrais, la dynamique du phosphore diffère entre le sol sans gypse, à 5% de gypse, et les sols à 20, 40 et 60% de gypse.

Le sol sans gypse retient des quantités importantes du phosphore apporté, car suite à l'apport d'engrais, il y a un déséquilibre chimique, le sol tend à établir un nouvel équilibre, généralement près de la valeur sans apport d'engrais, par la rétention des quantités en surplus. Cette rétention est expliquée par le pouvoir fixateur élevé déjà déterminé.

Le sol à 5% de gypse se comporte presque comme le sol sans gypse ou même fixe des quantités moindres de phosphore cela est dû à l'amélioration du pH par rapport au sol sans gypse.

Les sols à 20, 40 et 60% de gypse fixent de grandes quantités de phosphore apporté, cette fixation est proportionnelle à la teneur en gypse. Le sol à 60% fixe plus de 90% du phosphore apporté.

L'apport d'engrais au sol à 20% de gypse a amélioré la teneur en phosphore assimilable de ce dernier par rapport au sol sans gypse et sans engrais, donc la fertilisation est efficace.

Le sol à 40% de gypse présente de faible teneur en phosphore assimilable même après fertilisation, et nécessite l'apport de plus grande quantités d'engrais pour être cultivé, et il peut être non rentable économiquement.

Le sol à 60% peut bloqué de très grandes quantités du phosphore apporté et en courte période même après fertilisation. La fixation du phosphore est rapide, la majorité du phosphore apporté est retenu à 21 jours surtout pour les traitements à teneurs élevées en gypse.

Pour l'étude de l'influence des teneurs croissantes de gypse sur la croissance du ray-grass d'Italie, et de la biodisponibilité du phosphore pour cette plante, les conclusions suivantes sont ressorties:

D'une façon générale, le sol à 5% de gypse sans apport ou avec apport d'engrais a présenté les meilleurs résultats (production de matière sèche et absorption du phosphore) suivit du traitement sans gypse, ensuite des sols à 20% de gypse, puis de 40% et enfin à 60% de gypse (sans apport ou avec apport d'engrais).

Le traitement à 5% de gypse surtout à apport de 500ppm de TSP a présenté les meilleurs résultats, la plus grande quantité de matière sèche et d'absorption de phosphore. La teneur de 5% de gypse a un effet favorable sur le développement de la plante. Etant donné que le sol témoin est argilo-sableux lourd, à pH élevé (8.07), l'apport de 5% de gypse a probablement amélioré l'état physique du sol par une diminution de la densité apparente, une meilleur aération et infiltration de l'eau et par conséquence une meilleur utilisation des éléments nutritifs présents, même en faibles quantités, par les racines, en plus de l'amélioration du pH par rapport à celui du sol témoin.

Il y a diminution de la croissance et de l'absorption du phosphore en fonction de l'augmentation des teneurs en gypse. A 60% de gypse la plante dépérit après 36 jours, la croissance à 21 jours peut être due aux éléments nutritifs apportés par la semence. Cependant, Après l'apport d'engrais à tous les traitements, il y a une amélioration de la quantité de matière sèche produite et de l'absorption du phosphore par rapport aux traitements sans engrais, mais cette amélioration est de moins en moins marquée que les teneurs en gypse sont élevées.

Le sol à 20% de gypse et à apport d'engrais présente des résultats satisfaisants, donc les sols à moyenne teneur en gypse répondent à la fertilisation phosphatée et peuvent être cultivées, alors que le sol à 40% de gypse a présenté de faibles résultats même après apport de 500ppm par rapport au sol sans gypse et sans engrais, donc l'apport d'engrais n'a pas amélioré la teneur en phosphore total de la plante et la matière sèche produite. Les sols à 60% de gypse ont présenté de très faibles résultats.

L'influence du gypse sur l'assimilabilité du phosphore, a été montrée par les deux méthodes d'extractions Joret-Hebert et Olsen, mais les résultats de la seconde méthode sont plus corrélés avec le test biologique, ce qui prouve que la méthode Olsen extrait les formes du phosphore absorbées par la plantes. Cependant cette méthode présente une lourdeur économique (nécessite beaucoup de produits chimiques qui peuvent être indisponibles).

Au terme de ce travail, il est important de mentionner la nécessité de poursuivre cette étude, de déterminer les possibilités de l'utilisation de gypse comme amendement. Comme il est primordial de préciser le seuil à partir duquel le gypse devient un facteur limitant à la fertilité phosphatée, et au développement des plantes. Ainsi que de proposer des solutions au problème de la faible biodisponibilité du phosphore dans les milieux gypseux.

References bibliographiques

Références bibliographiques

Abdessalem S., 1999 – Contribution à l'étude des sols du nord est du Sahara Algérien : caractérisation et genèse, cas des oasis de Tolga (Régions des Zibans).Thèse.Mag. INA.Alger.

Anonyme, 1955 – Contribution a la détermination des besoins des sols en acides orthophosphoriques. Ann.agr.II.: 235-290

Anonyme, 1967 – Méthodes et technique de l'analyse des terres.Doc.N°34, centre national de la recherche.

Anonyme, 1995 – Procedures for soil analysis. Inst.nat. soil.ref.inf.cer.Netherland. 56p.

Akinrami et Cho, 1991 – Phosphate and accompanying cation transport in a calcareous cation exchangeresin system. Siol.sci.soc.Am.j.(55)°4: 959-963.

Armstrong D.L., 1999 – Important factors affecting crop response to phosphorus. Better crop. (83)1, 4p.

Aubert C.N.1965 – Classification des sols,Tableaux des Classes, Sous classes, Groupes et Sous Groupes de Sols utilisés par la section de Pédologie de l'O.R.S.T.O.M. Cahiers O.R.S.T.O.M. Sér. Ped., III, N° 3.

Badia D., 2000 – Potentiel nitrification rates of semi arid crop land soils from the central Ebro-Valley,Spain. Arid.soils.res.reha.,jour. nat.agr.(14)3: 281-292.

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

Bapari H.K., Sharma , 2003 – An effective water-extraction procedure for the determination of available phosphorus.Agr.Chem. (VXLVII)1-2 :. 61-68.

Barber S.A., 1998 – Essai de séfinition de la fertilité du sol .Bull.AFES.N°67./210-217.

Berg W. K., Cunningham S. M., Brouder S. M., Joern B. C., Johnson K. DSantini., J. et Volenec J. J. , 2005 -Influence of Phosphorus and Potassium on Alfalfa Yield and yield Components. Crop Sci. N°45:297-304

Bonneau, M. et Souchier, B.,1994. Pédologie : 2. Constituants et propriétés des sols, tome 2. Masson, Paris, 2^{ème} ed. 665 p.

Boyadjiev T.G.et Verhey W.H., 1997 – Evaluating the land use potential of gypsiferous soils from pedogenic characteristics. soil use and management. SCILIB. 13(2).

Boyadjiev T.G., Verheye W.H., 1996 –Contribution to a utilitarian classification of gypsiferous soils. Geoderma 74: 321-338.

-
- Brossard M. et Laurent J.Y , 1992 - Le phosphore dans les vertisols de la Martinique (Petites Antilles). Relations avec la matière organique.Cah. Orstom, sér. Pédol.,(XXVII)1: 109-119
- Carreira, J. A. et Lajtha, K. , 1997. -Factors affecting phosphate sorption along a mediterranean dolomitic soil and vegetation chronosequence. Eur. J.Soi. Sci., N°48: 139-149.
- Castro, B. et Torrent, J. 1998. - Phosphate sorption by calcareous vertisol and inceptisols as evaluated from extended P-sorption curves. Eur. J.Soi. Sci,N° 49: 661-667.
- Cho M., 1991 – Phosphorus transport in calcium-saturated systems.1.theory. Soil.sci.soc.J.Am.(25)5: 1275-1281.
- Colomb B., Kiniry J.R and Debacke P, 2001 – Effect of soil phosphorus on leaf development end senescence dynamics of field grownd maize, Agr.J, N°94:428-435.
- Copponet L., 1988 – Influence de la teneur du sol en P2O5 assimilable de l’apport d’engrais phosphate et de la hauteur des précipitations estivales sur la richesse en phosphore du ray-grass Italien Lolium multiflorum.INRA.RADP.: 481-503.
- Datago, Uceda, Andrea, Kassem ans Delcampilo, 2000 – Changes in Olsen phosphorus in reclaimes marsh soils on gypsum r.c.s.Spain.Dprt.
- Dazzi C.et Scalench R., 2002 – Soil with gypsic horizon in Mediterranean climate, a case study, symporium N°2, paper 1331.Dprt.agr.unv.Pallerno. Italy.p 818.
- Diehl, 1975 – Agriculture générale. Ed. J.B. Paris, 369p.
- Djili K., 2000 – Contribution à la connaissance des sols du nord de l’Algérie, création d’un banque de données informatisée et utilisation d’un système d’inforamtion géographique pour la spacialisation et la valorisation des données pédologiques. Thèse.Doc.INA.Alger, 243p.
- Duthil J., 1967 – La production fourragères.Ed.J.B.Paris.320p.
- Duthil P., 1973 – élément d’écologie .Ed.J.B. TII.Paris. p155-452.
- Driessen P. et Deckas j., 2001 – Lecture notes on the major soils of the world. FAO. Italy.
- Duval L., 1962 –Dosage sulfomolibdique d l’acide phosphorique dans le sols, les végétaux et les engrais. Ann.agr.
- Donald D. et Chpmanns S.J., 1998 – Use of powered element and sulphur for grass en claver, commun, soil.sci.plant.anal.29 : 1317-1328.
- Esilaba A.O., Eghball O.H. et Sander , 1992 – Soil test phosphorus affected by time after phosphorus fertlization. Soil.sci.soc.Am.j., V56.: 1967-1973.

Evers G. W., 2002 – Ryegrass–Bermudagrass Production and Nutrient Uptake when Combining Nitrogen Fertilizer with Broiler Litter. *Agron. J.* 94:905–910 905-910.

FAO, 1990 – gypsifereous soils in the world soils. ser.FAO.Land and water dvpt.bul.62., Rome

FAO/ISRIC/ISSS, 1998 – world reference for soil resources, world soil resources report V48. Rome.

Fardeau J.C., 1993a – Le devenir du phosphore assimilable dans le sol et dans les systèmes sol-plante, perspectives agricole, N°181. XVII-XXII.

Fardeau J.C. 1993b – Le phosphore assimilable des sols, se représentation par un modèle fonctionnel à plusieurs compartiments, agr.Elsevier/INRA.N°13 : 313-331.

Fardeau J.C., 2000 – Estimation de la biodiponibilité des éléments nutritifs contenus dans les produits réseduaire organiques. *Rev.ingen.*N°21., 12p.

Fardeau J.C., Guirand et morol C., 1997 –Phosphate fertilization : the evolution of its representation over the century. *a spe.repor.plant.phys*:117-127.

Fardeau J.C., Morel C., Boniface R., 1998 – Pourquoi choisir la méthode Olsen pour estimer le phosphore assimilable des sols. *Agr.*(8)7, :577-584.

Farina M.P.W., Channon P. and Thibaud G.R., 2000 -**A Comparison of Strategies for Ameliorating subsoil Acidity II. Long-Term Soil Effects** *Soil Sci. Soc. Am.j.* N° 64:652-658

Freeman J.S. et Rowell D.L., 1981 – The adsorption and precipitation of phosphate on calcite. *j.soil.sci* 32., p: 75-84.

Frenkel H., Gersti Z. et JanRengerVandeven, 1986 – Determination of gypsum and cation exchange capacity in aride soils by a resin methode. *Geoderma,Elsevier, ISSS-AISS-IBG.*N°39.p: 67-77.

Frossard, E., Brossard, M., Hedley, M. J. et Metherell, A., 1995 – Reactions controlling the cycling of P in soils. Dans : Phosphorus in global environment, ed. T. H., t. 2. John Wiley & Sons Ltd., Paris. V 54: 108-137.

Gachon L., 1972 – Fractionnement du phosphore labile en relation avec le type du sol. *Ann.agr.*(23)4.:429-444.

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

Gachon L. et Triboi F., 1988 - Etude des méthodes d'appréciation de l'offre phosphatés du sol – le sphosphore et le potassium dans les relations sol-plante. *INRA.*:181-191.

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

Gobat J.M., Aragnon M. et Matthey W., 1998 – le sol vivant. Press.Poly.Univ.Romane. Lausanne.519p.

Gros A., 1979 –Guide pratique des relations entre l'alimentation phosphatée des cultures et les valeurs E et L. INRA.: 205-215.

Guivarche A., 2001-Valeur fertilisante à court terme du phosphore des boues de stations d'épuration urbaines. INRA. Bordeaux, France, 306p.

Halitim A., 1985 – contribution à l'étude des régions arides d'Algérie.thèse. doc. ENSA.Renne

Halitim A., 1988–Les sols des régions arides d'Algérie. OPU.Alger, 395p.

Halvin J.L. et Watsfall D.G., 1984 – Soil test phosphorus and solubilities relationships in calcareous soils. Soil.sci.soc.Am.j.(48)2, p:327-330.

Hamdy A. et Makhoulouf A., 2002 –Advances in soil salinity and drainage management to save water and protect the environment. Min.agr.Algérie.p:35-58.

Hamza M.A. et Anderson W.K., 1999 – Residual effect of deep reaping, gypsum and nutrients on grain yields and soil physical properties. Agr.West.Aust..crop.apl.cere.

Harrison, A.F, 1987 –Soil organic phosphorus: a review of world literature. CAB International, Wallingford. 257p.

Hinsinger , 2001 – Bioavailability of soil inorganic phosphorus in the rhizospheres as affected by root-induced chemical changes, review. I.N.R.A.,U.M.R., plant and soil, 237: 173-175.

Horta, 1980 –_Calcret gypsret and soil classification in Algeria Ingn. Geol.N°15, p: 12-15

Hue N.H., 1991 – Effect of organic acid/anions on phosphorus sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies. Soil.sci, 152 N°6, p: 463-471.

Jafarzadeh A.A. et Zinck J.K., 2000 –Worldwide distribution and sustainable management of soils with gypsum.Univ.Tabriz.Fac.agr.siol.sci.dpt.Iran6p.

Jarwal S.D. Armstrong R.D. et Rengasamy P., 1999 - Effect of Gypsum and Stubble retention on Crop productivity in Western Victoria. The Austral.soci.agron.

Jea-Hshuanchen et Barber S, 1990 – Soil ph and phosphorus and potassium uptake by maize evaluated with an uptake mode. Soil.sci.sco.Am.j.V54: 1032-1036.

Khademi H. et Mermut A.R., 2003 – Micromorphologie and classification of argids and associated gypsiferous ardisols from central. Iran.Catena.N°54: 439-435.

Kowalenko C.G., 2004 –Repense of Colombia soils. Can.j.soil.sci., (84)2: 227-236.

Kvarnström E., 2001. Plant-availability of phosphorus removed from wastewater by different process. Department of Environmental Engineering. Division of Sanitary Engineering. Thèse.univ. tech. Luleå, Suède. 143 p.

Labay Y., Olson A.M., Galand A. et Tsiourtis N., 1988 –Design and optimization of irrigation distribution networks. FAO.paper 44, : 221-223.

Lagerwerff J.K., Akin G.W. et Moses W., 1965 –detection and determination of gypsum in soils. *Soil.sci.soc.Am.j.proc.* (20)5,: 535-540.

Lal, R, 2000 - Soil management in the developing countries. *Soil Sci.*, 165(1): 57-72

Leikam DF., Murphy L.S., Kissel D.E., Whitney D.A. et Mserh H.C., 1983 – Effect of nitrogen and phosphorus application and nitrogen source in winter wheat grand yield and leaf tissue phosphorus. *Soil.sci.soc.Am.j.*, (47)3 : 530-535.

Levesque, M. et Schnitzer, M., 1969 -Characterization of model and soil organic matter metal-phosphate complexes. *Can. J. Soil. Sci.*, N° 49 : 365-375.

Lindsay W., Levelk G., 1977 –Phosphate minerals.*soil.sci.soc.Am.j.inc.USA.*, p: 639-372.

Liu A., Hamel C., Begna S.H., Ma B.L. et Smith D.L., 2003 – Soil phosphorus depletion capacity of arbuscular mycorrhizae formed by maize hybrids. *Can.j.soil.sci.*, N°83: 337-342.

Loué A., 1978 –The interaction of potassium with other growth factors, particularly with other nutrients. *Potass.res.rec.tre.*: 47-431.

Loyer D.Y., 1991–Classification des sols sales : les sol salic. *cah.O.R.S.T.O.M.ser.ped.* (VXXVI)1: 51-61.

Malcom E., Sumner, 1990 –Gypsum as ameliorant for the subsoil acidity syndrome. *FIPTR.Pub.N°1*, 24p.

Mashali A.M. 1996 – Soil management practices for gypsiferous soils. International symposium with gypsum. Lleida., Spain.:34-51.

McDowell R.W. et Sharpley A.N. , 2003 - Phosphorus solubility and release kinetics as a function of soil test phosphorus concentration. (112)5, 1-2: 143-153.

McKenzie R.A. et Bremer E., 2003 –Relationship of phosphorus fraction to phosphorus soils tests and fertilizer response .*Can.j.soil.sci.* N°81.p: 443-449.

McKenzie R.A, Prent L.E. et Macleod J.A., 2003 – Influence of soil texture on fertilizer and soil phosphorus transformation in Gleysolic soils. *Can.j.soil.sci.soc.*N°81: 395-403.

Mc Laughlin, J. R., Ryden, J. C. et Syers, J. K , 1981 - Sorption of inorganic phosphate by iron- and aluminum-containing components. *J.Soil. Sci.* N°32: 365-377

Michel C.A. et Thiens S.J., 2003 –Phosphorus bioavailability following incorporation of grain manure crops. *Soil.sci.soc.Am.j.*V67: 1186-1194.

Miller W. P., 1989 – Use of gypsum to improve physical properties and water relations in southeastern soils. Pub.FPIR.No. 01-020-082.42p.

Molle P., 2003 – Filtres plantes de roseaux : limites hydriques et rétention du phosphore. Thèse. DOC. Univ. Montpellier. Sci. Tech.lan. France.280p.

Morel R., 1996 – Les sols cultivés. Ed. Lavoisier.378p.

Muhammed et Jones K.G., 1992 – Phosphorus in gypsiferous soils, the influence of soil properties on phosphorus fractionation.Geoderma.V53issue 1-2: 97-104.

Norrish, K. et Rosser, H., 1983 – Mineral phosphate. Dans : Soils, anaustralian viewpoint, edit_e par J. Lenaghan et G. J. Katsantoni, pages 335.36. CSIRO Academic Press, Australia.

Oxyonarte C., Sánchez G., Urrestarazu M., Alvarado J. J. , 2003 -A Comparison of Chemical Properties Between Gypsophile and Nongypsophile Plant Rhizospheres. Taylor & Francis Issue (17)1: 23 – 41

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

Panahi Kordlaghari M^{ed} et Rowell D.L, 2006 -The role of gypsum in the reactions of phosphate with soils.Geoderma,Volume 132, Issues 1-2. :105-115.

Pierzynski G.M., Sims J.T., Vance G.F., 2000 –soils and environmental quality. 2^{end} ED, CRC. Pres. Newyork. 459p.

Poch R., 1992 – Fabris and physical properties of soils with gypsic and hypergypic horizon of the Ebro Valley. These.P.HD.univ.Gent.285p.

Podwojewsky P et Petard J., 1996 – Comparaison entre différentes méthodes d'extraction des sels solubles et des cations échangeables dans un vertisol à gypse de nouvelle Calédonie.etud. gest.sol. N°3: 193-205.

Pouget M., 1968 – Mesure d'humidité sur des échantillons de sols gypseux. Cah.O.R.S.T.O.M: 139-148.

Prost R., 2000 – Protocole de suivi de la qualité des sols, des eaux et des végétaux autour des installations de 2^{ème} fusion de plomb.GSC.Fiche II C.

Quémener J., 1968 – Exemple d'application de la méthode Standfoprd-De ment à des problèmes d fertilisation phosphatée.Ann.agr.INRA. (5) 19: 589-604.

Ribeiro E.S., Dias L.E., ALVAREZ v.j., Mellwv et Daniel W.L., 2000 – Dynamics of sulfure fractions in Brazilian soil submitted oto consecutive harvests of sorghum.soil.sci.soc.Am.j. N°65: 784-794.

Ruiz J.M., Lopez L., Revero R.M. et Romero L., 2000 –Sulfur phytoaccumulation plante species characteristic of non gypsiferous plante rhizosphere.Pub.T.Francis.(17)1 :23-41.

Samadi, A. et Gilkes, R. J., 1998 -Forms of phosphorus in virgin and fertilised calcareous soils of western australia. *Aus.J.Soil Res.*,N°36 : 585-601.

Sander D.H., Pena B.J. et Soc J.A.M., 1990 – Soil inorganic phosphorus fractions and their uptake relationship in calcareous soils. *Soil.sci.soc.Am.j.*(54)6, p: 1566-1969.

Sanogo H., 1982 – Dynamique du phosphore en milieu gypseux.these.Ing.agr.INA., 92p.

Sanyal, S. K. et De Datta, S. K., 1991. -Chemistry of phosphorus transformations in soils. Dans : *Advances in soil science*, ed. B. A. Stewart, tome 16, Springe.Verlag, New York, U.S.A: 1-120

Sayegh A.H., Khan N.A., Khan P. et Rayan J., 1978 – Factors affecting gypsum ad cation exchange capacite determination in gypsiferous soils. *Soil.sci.soc.Am.j.*, (25)5 :94-300

Sharplay A.N., Curtin D., and Sayers J.K., 1988 – Changes in water-extractibility of soil inorganic phosphate induced by sodium saturation. *Soil.sci.soc.Am.j.*N°4, p: 959-963.

Sharplay A.N. and Smith , 1989 – Mineralization and leaching of phosphorus from incubated with surface applied and incorporated crops residue. *J. Env.Qul.*N°18 101-105.

Shihab R. M. Al-Ani A. N., and Fahad A. A.? 2002 -Dissolution and transport of gypsum in gypsiferous soil treated with fuel oil and bentonite *Agric Em. J, Sci.* 14: 01 - 07

Sidi H. Pansu M., 1990 - Effets d'apports organiques et de gypse sur la stabilité structurale de deux sols méditerranéens. *Science du s.* (28)3 : 237-25

Snoussi et Halitim A., 1996 – Valorisation des eaux salines pour la nutrition minérale des plantes cultivées. *Etud.gst.sols* 5-4. : 289-298.

Snyder C.S. et Slaton N. 2002 – Effect of soil flooding and drying on phosphorus reaction.*Inst.:I.niews and views.*4p.

Sposito, G., 1989 - The chemistry of soils. Oxford University Press, New York. 267p.

Sumner, M.E. 1990. Gypsum as an ameliorant for the subsoil acidity syndrome. Publ. no. 01-024-090. Florida Inst. of Phosphate Re search, Bartow, FL.

Tarafdar J.C. et Classen N., 2004 – Adsorption behaviours of inorganic and organic sources of phosphorus in soils.*Agrochemica*, (VXLVIII)12: 42-49.

Toomanian N., Jalalian A.n Eghbal M.K., 2003 – Application of the WRB (FAO) taxonomy systeme to gypsic soil in northest Isfahan. *Iran.j.agr.techn.*V5: 51-66.

Toma M., Sumner M. E Weeks. G. et Saigusa M., 1999 -Long-term Effects of Gypsum on Crop Yield and Subsoil Chemical Properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* N°39:891–895.

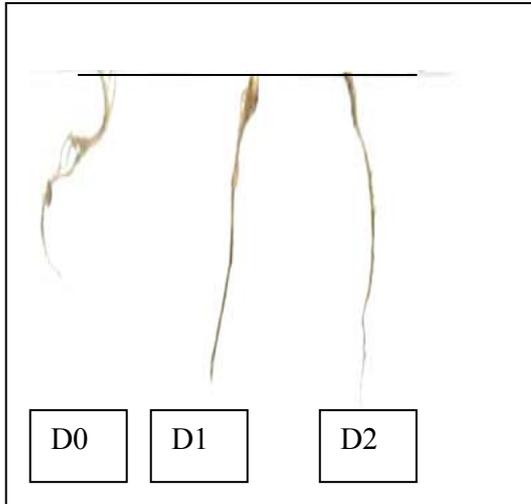
Triboi E., 1988 – Evolution à long terme de la fertilité phosphatée d'un sol calcaire soumis à l'influence de fumures minérales ou organiques..*INRA.Paris* : 242-252.

Van Alphen, De Los Rios Romero F. (1971) Gypsiferous soils, notes on characteristics and management. Int. Inst. of Land Recl. and Improv. Bulletin 12. Wageningen, the Netherlands.

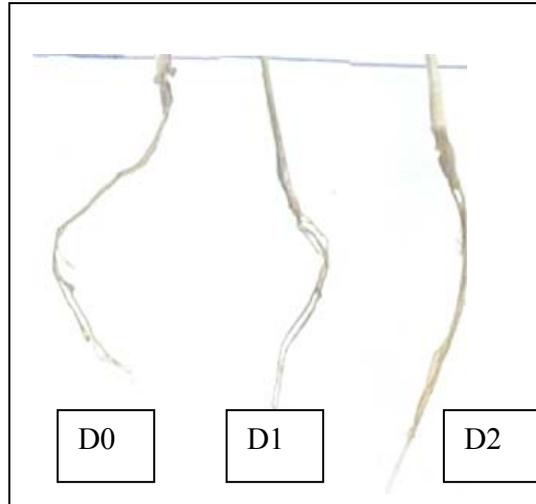
Annexe



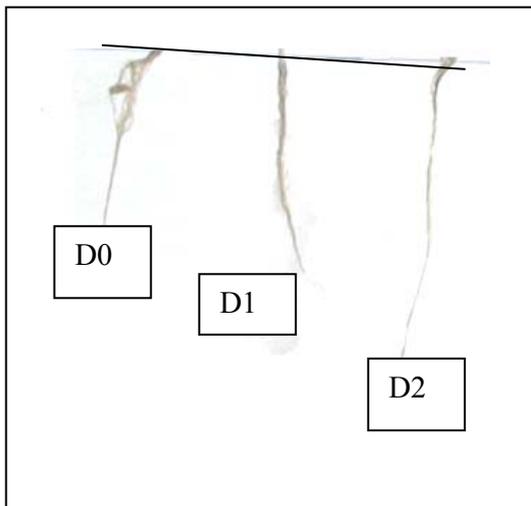
Dispositif expérimental



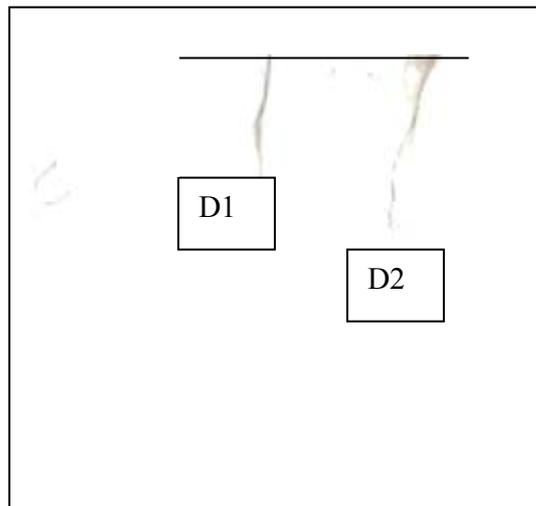
Racines des traitements SG0



Racines des traitements SG5



Racines des traitements SG20



Racines des traitements SG60

1cm

Longueur des racines à la troisième coupe



SG5D0



SG5D1



SG5D2



SG0D0



SG0D1



SG0D2



SG20D0



SG20D1



SG20D2



SG40D0



SG40D1



SG40D12



SG60D 0



SG60D1



SG60D2

Les plantes à la deuxième coupe

Tableau 1 : Teneurs en phosphore assimilable joret-Hebert des différents traitements en ppm et en pourcent par rapport aux teneurs initiales

		SG0		SG5		SG20		SG40		SG60	
		ppm	%								
21j	D0	115	92	101.37	81.1	90.65	56.52	33.4	26.72	10.07	8.06
	D1	290.11	77.37	243.66	64.98	163.95	43.72	99.06	26.42	79.37	21.17
	D2	450	72	426.81	68.66	363.17	58.1	279.08	44.65	154.47	24.71
36j	D0	92	73.6	64.35	51.48	48.74	39	14.57	11.66	0	0
	D1	198.71	52.99	190.58	50.83	103.45	27.59	56.38	15.04	49.68	13.25
	D2	310	60	322.14	60.04	196.78	31.49	170.01	27.21	89.37	14.3
51j	D0	81	64.8	59.41	47.41	16.98	38.59	6.68	5.35	0	0
	D1	114	30.4	119.97	32	75.34	20.3	36.37	9.7	29.83	7.84
	D2	235	37.2	248.91	39.83	130.03	20.81	60.33	9.63	49.35	7.92

Tableau 2 : Teneurs en phosphore assimilable Olsen des différents traitements en ppm et en pourcent par rapport aux teneurs initiales.

		SG0		SG5		SG20		SG40		SG60	
		ppm	%	ppm	%	Ppm	%	ppm	%	ppm	%
21j	D0	71	83.52	66.5	78.24	34.49	40.58	12.81	15.08	0	0
	D1	211.2	63.05	196.42	51.82	94.84	28.32	64.95	19.39	47.3	15.32
	D2	370	63.25	355.67	64.8	243.41	41.60	104.86	17.92	88.84	15.18
36j	D0	59	69.42	49	57.65	17.25	20.39	0	0	0	0
	D1	165	48.96	155.34	40.4	70.86	21.15	35.81	10.69	21.83	5.4 ?
	D2	284	48.55	294.09	50.27	113.81	19.46	96.8	16.55	43.72	7.48
51j	D0	52	61.18	41.93	49.33	8.61	10.13	0	0	0	0
	D1	99	29.96	105.11	31.37	43.05	12.85	25.24	7.54	0	0
	D2	168	28.72	191.11	32.67	83.5	14.28	50.10	8.56	0	0

Tableau 3: Quantités moyennes du phosphore assimilable joret-hebert retenues par le gypse (par rapport aux traitements sans gypse)

		SG5		SG20		SG40		SG60	
		ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%
21j	D0	13.63	11.58	44.35	38.50	81.6	70.95	104.93	91.24
	D1	46.45	16.01	126.16	43.48	191.05	65.85	210.74	72.64
	D2	23.19	5.15	86.83	19.29	170.92	37.98	295.53	65.67
36j	D0	27.65	30.05	43.26	47.02	77.43	84.16	92	100
	D1	81.3	4.09	95.26	47.93	142.33	71.62	149.03	74.99
	D2	-	-	113.22	36.52	139.99	45.15	220.63	71.17
51j	D0	21.59	26.65	64.02	79.03	74.32	91.75	81	100
	D1	-	-	38.66	33.91	77.63	68.09	84.17	73.83
	D2	-	-	104.97	44.66	174.67	74.32	185.65	79

Tableau 4 : Quantités moyennes du phosphore assimilable Olsen retenues par le gypse (par rapport aux traitements sans gypse)

		SG5		SG20		SG40		SG60	
		ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%
721j	D0	4.6	6.33	36.51	51.42	58.19	81.95	71	100
	D1	14.78	6.99	116.36	55.09	146.25	69.24	163.9	77.6
	D2	14.33	3.87	126.59	34.21	256.14	71.69	281.16	75.98
36j	D0	10	16.94	41.75	70.76	59	100	59	100
	D1	9.66	5.85	94.14	57.05	129.19	78.29	143.17	86.76
	D2	-	0	170.19	59.92	187.2	65.9	240.78	84.6
51j	D0	10.07	19.36	43.39	83.44	52	100	52	100
	D1	-	0	55.95	56.51	73.76	74.5	99	100
	D2	-	0	84.5	50.26	117.9	70.17	168	100

Tableau 5 : Matière sèche moyenne produite en (g) en fonction de la teneur en gypse et du temps

		SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
21j	D0	0.42	0.52	0.28	0.12	0.02
	D1	0.54	0.64	0.36	0.24	0.10
	D2	0.76	0.84	0.46	0.26	0.11
36j	D0	0.92	0.94	0.56	0	0
	D1	1.32	1.4	0.96	0.46	0.14
	D2	1.58	1.8	1.18	0.48	0.28
51j	D0	1.06	0.26	0.90	0	0
	D1	1.58	2.42	1.5	0.12	0
	D2	2.16	3	0.66	0.24	0

Tableau 6 : Teneurs moyennes en phosphore total en % de la matière sèche produite

		SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
21j	D0	0.21	0.23	0.16	0.08	0.01
	D1	0.29	0.32	0.24	0.14	0.05
	D2	0.41	0.43	0.31	0.20	0.10
36j	D0	0.27	0.28	0.18	0	0
	D1	0.35	0.37	0.28	0.16	0.08
	D2	0.45	0.47	0.35	0.20	0.12
51j	D0	0.30	0.33	0.15	0	0
	D1	0.42	0.44	0.20	0.12	0
	D2	0.48	0.52	0.27	0.18	0

Tableau 7 : Quantités moyennes du phosphore absorbé par les plantes en mg de P/pot

		SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
21j	D0	0.882	1.196	0.448	0.096	0.002
	D1	1.566	2.048	0.864	0.336	0.05
	D2	3.116	3.612	1.116	0.520	0.110
36j	D0	2.484	2.632	0.828	0	0
	D1	4.620	5.180	2.688	0.736	0.112
	D2	7.11	8.46	4.13	0.960	0.336
51j	D0	3.180	4.158	1.350	0	0
	D1	6.636	10.648	4.482	0.432	0
	D2	10.368	15.60	4.482	0.432	0

Tableau 8 : vitesses de croissance en mg/j/pot du ray-grass pour les différents traitements

		SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
21j	D0	20	24.76	13.33	5.71	0.92
	D1	25.71	30.47	17.14	11.42	4.76
	D2	36.19	40	21.9	12.38	5.23
36j	D0	61.33	62.26	34.66	15.33	2.66
	D1	88	93.33	64	30.66	9.33
	D2	105.33	120	78.66	32	18
51j	D0	70.66	84	60	0	0
	D1	105.33	161.33	100	8	0
	D2	144	200	110.66	16	0

Tableau 9 : Vitesses d'absorption du phosphore en µg/j/pot des différents traitements en fonction de la teneur en gypse, de la dose d'engrais et du temps.

		SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
21j	D0	42	56.95	21.33	4.57	0.096
	D1	74.57	97.52	41.14	16	2.38
	D2	148.38	172	53.14	24.76	5.23
36j	D0	165.6	175.46	55.2	0	0
	D1	308	345.33	179.2	49.06	7.46
	D2	474	564	275.33	49.06	22.4
51j	D0	212	277.2	90	0	0
	D1	442.4	709.86	200	9.6	0
	D2	691.2	1040	298.8	28.8	0

Analyse de la variance pour les résultats obtenus

Analyse de la variance pour les résultats obtenus

*** = test très hautement significatif.

Tableau 10 : Analyse de la variance pour les résultats du Pjh (tout les traitements)

Origine de la var.	DDL	Test F	Probabilité	E.T	C.V
Var.totale	59				
Var.f1	4	612.79	0.000		
Var.f2	2	231.82	0.000		
Var.F1xF2	8	60.93***	0.000		
Var résiduelle	45			3.26	21.12

Tableau 11 : Analyse de la variance pour les résultats du Pols (tout les traitements)

Origine de la var.	DDL	Test F	Probabilité	E.T	C.V
Var.totale	59				
Var.f1	4	105.2	0.000		
Var.f2	2	99.3	0.000		
Var.F1xF2	7	52.32***	0.000		
Var résiduelle	45			2.55	15.2

Tableau 12 : Analyse de la variance pour les résultats sans apport d'engrais

Origine de la var.	DDL	Test F	Probabilité	E.T	C.V
Var.totale	14				
Var.f1	4	69.07***	0.000		
Var résiduel	10			0.72	21.1%

Tableau 13 : Analyse de la variance pour les résultats du Pjh avec apport de D1

Origine de la var.	DDL	Test F	Probabilité	E.T	C.V
Var.totale	14				
Var.f1	4	53.3***	0.0000		
Var résiduelle	10			1.01	14.2%

Tableau 14 : Analyse de la variance pour les résultats du Pjh avec apport de D2

Origine de la var.	DDL	Test F	Probabilité	E.T	C.V
Var.totale	14				
Var.f1	4	9.26***	0.0023	0.52	0.76
Var résiduelles	10				

Tableau 15 : Analyse de la variance pour les résultats du Pols sans apport d'engrais

Origine de la var.	DDL	Test F	Probabilité	E.T	C.V
Var.totale	14				
Var.fl	4	42.3***	0.000		
Var résiduelle	10			0.64	37.6%

Tableau 16 : Analyse de la variance pour les résultats du Pols avec apport de D1

Origine de la var.	DDL	Test F	Probabilité	E.T	C.V
Var.totale	14				
Var.fl	4	66.25***	0.000		
Var résiduelle	10			0.95	18.4%

Tableau 17 : Analyse de la variance pour les résultats du Pols avec apport de D2

Origine de la var.	DDL	Test F	Probabilité	E.T	C.V
Var.totale	14				
Var.fl	4	33.46***	0.000	0.21	24.5%
Var résiduelle	10				

Tableau 18 : Analyse de la variance pour les résultats du la Ms totale (tout les traitements)

Origine de la var.	DDL	Test F	Probabilité	E.T	C.V
Var.totale	59				
Var.fl	4	43.72	0.000		
Var.f2	2	11.62	0.000		
Var.F1xF2	8	1.72***	0.000		
Var résiduelle	45			0.7	35%

Tableau 19 : Analyse de la variance pour les résultats du Prélèvement total (tout les traitements)

Origine de la var.	DDL	Test F	Probabilité	E.T	C.V
Var.totale	59				
Var.fl	4	75.59	0.0000		
Var.f2	2	43.81	0.0000		
Var.F1xF2	8	7.74***	0.0000		
Var résiduelle	45			0.18	31.2%

Tableau 20 : Analyse de la variance pour les résultats de la matière sèche totale sans apport d'engrais

Origine de la var.	DDL	Test F	Probabilité	E.T	C.V
Var.totale	14				
Var.fl	4	46.24***	0.0000		
Var résiduelle	10			0.32	22.5%

Tableau 21 : Analyse de la variance pour les résultats de la matière sèche totale avec apport de D1

Origine de la var.	DDL	Test F	Probabilité	E.T	C.V
Var.totale	14				
Var.fl	4	11.01***	0.0012		
Var résiduelle	10			0.83	38.4%

Tableau 22 : Analyse de la variance pour les résultats de la matière sèche totale avec apport de D2

Origine de la var.	DDL	Test F	Probabilité	E.T	C.V
Var.totale	14				
Var.fl	4	18.84***	0.0002		
Var résiduelle	10			0.81	28.9%

Tableau 23: Analyse de la variance pour les résultats du prélèvement total sans apport d'engrais

Origine de la var.	DDL	Test F	Probabilité	E.T	C.V
Var.totale	14				
Var.fl	4	18.79***	0.0002		
Var résiduelle	10			0.41	36%

Tableau 24: Analyse de la variance pour les résultats du prélèvement total avec apport de D1

Origine de la var.	DDL	Test F	Probabilité	E.T	C.V
Var.totale	14				
Var.fl	4	71.98***	0.000		
Var résiduelle	10			0.46	18.6%

Tableau 25: Analyse de la variance pour les résultats du prélèvement total avec apport de D2

Origine de la var.	DDL	Test F	Probabilité	E.T	C.V
Var.totale	14				
Var.fl	4	54.30***	0.0000		
Var résiduelle	10			0.8	21.7%

Tableau 26 : Teneurs initiales en phosphore total des différents traitements en ppm (sol)

	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
D0	950	894.76	759.06	441.70	287.20
D1	1200	1144.76	1009.06	691.7	537.2
D2	1450	1394.76	1259.06	941.7	787.2

Tableau 27 : Quantités totales du phosphore prélevé en mg/pot par la plante

	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
D0	6.546	7.986	2.626	0.096	0.002
D1	12.822	17.876	6.552	1.216	0.162
D2	20.59	27.679	9.728	1.912	0.446

Tableau 28: Teneurs finales en phosphore total des différents traitements en ppm (sol)

	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
D0	943.32	886.54	756.50	441	287.20
D1	1187	1126	1002	690.59	537
D2	1429	1376.90	1249	940	786.75

Tableau 29 : Teneurs finales en phosphore assimilable joret-Hebert en ppm sans pendre en considération les quantités absorbées par la plante

	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
D0	75.49	52.42	15.78	6.60	0
D1	101.97	102.09	69.78	35.92	29.80
D2	215.42	222.231	121.302	59.41	48.90

Tableau 30 : Teneurs finales en phosphore assimilable Olsen en ppm sans pendre en considération les quantités absorbées par la plante.

	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
D0	46.49	34.64	6.89	0	0
D1	86.99	88.23	37.66	25.01	0
D2	156.37	164.5	74.72	49.29	0

Tableau II-32 : Matière sèche produite en gramme par les racines

	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
D0	0.54	0.81	0.43	0.33	0.11
D1	1.2	1.5	0.48	0.4	0.2
D2	2.4	3.81	0.59	0.45	0.25

Tableau II-33 : Teneurs moyennes en phosphore total en % de la matière sèche produite par les racines.

	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
D0	0.11	0.12	0.009	0.046	0.002
D1	0.17	0.192	0.15	0.09	0.0042
D2	0.2	0.2	0.18	0.14	0.094

Tableau II-34 : Quantité du phosphore en mg\pot de sol cumulé par les racines

	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
D0	0.594	0.972	0.395	0.152	0.0023
D1	2.04	2.88	0.72	0.36	0.0084
D2	4.8	7.62	1.062	0.637	0.237

Tableau II-35 : Longueur des racines en cm

	SG0	SG5	SG20	SG40	SG60
D0	5	5.5	2.3	1.8	1.3
D1	5.2	6.5	3.1	2	1.5
D2	6	8	5.4	4.2	3

Résumé

L'objectif de notre expérimentation est d'étudier l'influence des teneurs croissantes de gypse sur la dynamique du phosphore dans le sols et sa cinétique d'absorption par le ray-grass.

L'essai est conduit au laboratoire en pots de matière plastique, avec un sol non salé, auquel le minerai de gypse été apporté à différents pourcentages (0% , 5%, 20%, 40%, et 60%). Pour mieux démontrer l'effet du gypse sur la dynamique du phosphore. Trois doses d'engrais de triple superphosphate ont été apportées. L'évolution de l'assimilabilité du phosphore été étudiée par les deux méthode d'extraction ; Joret-Hebert et Olsen, et suivit en fonction du temps (après 21,36 et 51jours). En parallèle, l'assimilabilité du phosphore été appréciée par la culture de ray-grass d'Italie. Trois coupes simultanées au prélèvements du sont réalisés. A l'issu de chaque coupe, la matière sèche produite, la teneur en phosphore de la plante, ainsi que les quantités de phosphore absorbées par la plante sont déterminées.

Les résultats obtenus ont fait ressortir que :

Le sol sans gypse retient le phosphore, car il présente un pH basique, et un taux de saturation élevé du complexe adsorbant.

La faible teneur en gypse du sol peut être considéré non néfaste à l'assimilabilité du phosphore après apport d'engrais.

Le phosphore est insolubilisé par les teneurs élevées de gypse. L'insolubilisation de ce dernier est expliqué par sa réaction avec le Ca^{2+} apporté par le gypse, et son adsorption sur la surface du gypse.

Le test biologique a montré que l'apport d'une teneur de 5% de gypse a un effet favorable sur la cinétique de la croissance et de l'absorption du phosphore par la plante. Alors que les teneurs moyenne et élevée de gypse ont un effet inverse.

Mots clés : phosphore, gypse, précipitation, dynamique, ray-grass, cinétique, croissance, absorption

الملخص

ان الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير كميات متزايدة من الجبس على ديناميكية الفوسفور في التربة وحركية امتصاص هذا العنصر من طرف نبات عشبي اخضر .

التجربة اجرية في المخبر باستعمال تربة غير مالحة حيث اضفنا اليها نسب من الجبس (0.5,20.40.60 بالمئة) . ولتبيين تأثير الجبس على الفوسفور قمنا باضافة سماد فوسفوري. بكميات معينة ودرسنا تطور الفوسفور المستوعب في التربة كيميائيا بطريقتين (جوري هيبير واولسن).

بالموازات استعابية الفوسفور قدرت باستعمال النبات العشبي الاخضر . قمنا بجني النبات ثلاث مرارة في نفس الوقت الذي اخذنا فيه عينات التربة وقمنا بتقدير المادة اليابسة . وكميات الفوسفور في النبات و الكميات التي امتصها النبات من الفوسفور .

التنتائج المتحصل عليها بينت ما يلي

في التربة التي لم يضاف اليها الجبس . الفوسفور يترسب بسبب كون هذه الاخيرة قاعدية وتشبع مراكز تبادل الشحني ابكاتيونات الكالسيوم

في حالة اضافة كميات قليلة من الجبس هذا الاخير ليس له تاثيرات سلبية كبيرة خاصة عند اضافة السماد

عند اضافة نسب عالية من الجبس الى التربة . كميات كبيرة من الفوسفور المستوعب تترسب بسبب تفاعل هذا العنصر مع الكالسيوم الذي مصدره الجبس

التجربة البيولوجية بينة ان اضافة كمية قليلة من الجبس لديها تاثير ايجابي على النبات . في حين الكميات العالية من الجبس لديها تاثير عكسي

كلمات مفتاحية الفوسفور- الجبس-الترسب-ديناميكية-العشب الاخضر- حركية امتصاص-نمو

