



TRANSFERT DE TECHNOLOGIE EN AGRICULTURE

MAPM/DERD

• Août 2007 •

PNTTA

Fertilisation Minérale des Cultures

Les éléments fertilisants majeurs (Azote, Potassium, Phosphore)

Introduction

Les plantes prélèvent les éléments minéraux du sol pour produire les composés organiques. Il est établi que plusieurs éléments sont nécessaires pour le fonctionnement normal de la machine biochimique de la plante. Les éléments nutritifs doivent être présents sous une forme assimilable pour que les végétaux puissent les absorber. La fertilisation minérale a pour but d'apporter le complément nécessaire à la fourniture du sol en vue de répondre aux besoins physiologiques des plantes pour une croissance et un développement optimaux.

De nos jours, on connaît plus de 100 éléments chimiques; mais seulement 17 sont considérés essentiels en raison de leur importance pour la croissance et le développement des plantes (Tableau 1). Ces éléments sont classés en trois catégories: les éléments essentiels majeurs (Azote, Phosphore et Potassium); les éléments secondaires (Calcium, Magnésium et Soufre); et les oligo-éléments (Fer, Zinc, Manganèse, Cuivre, Bore, Molybdène, Chlore et Nickel).

La diversité et l'importance des fonctions remplies par les éléments minéraux confirment la nécessité de s'assurer de la disponibilité de ces éléments en quantités suffisantes pour une production optimale des cultures.

Parmi ces 17 éléments chimiques essentiels, le carbone, l'hydrogène et l'oxygène sont prélevés à partir de l'air et de l'eau. Les 14 autres éléments (Tableau 1) sont normalement absorbés par les racines de la plante à partir du sol.

Dans ce bulletin, nous allons traiter des éléments minéraux majeurs, notamment les facteurs et conditions de disponibilité et d'absorption, les problèmes de carence ainsi que les conséquences pratiques pour une fertilisation adéquate en chacun des éléments minéraux.



Engrais granulés

L'azote (N)

Formes de l'azote dans le sol

Dans le sol, l'azote se trouve essentiellement sous trois formes: organique, ammoniacale et nitrique. L'azote est assimilé par la plante sous la forme nitrate (NO_3^-) ou ammonium (NH_4^+). Les plantes peuvent utiliser ces deux formes à la fois dans leur processus de croissance. Cependant, la partie la plus importante de l'azote absorbée par la plante l'est sous forme de nitrate. Cet ion est mobile et circule avec la solution du sol vers les racines de la plante. Sous certaines conditions de température, d'aération, d'humidité et de pH, les micro-organismes du sol changent toutes formes d'azote en nitrate.

La forme organique représente presque 95% de l'azote total du sol, notamment sous forme de matière organique. Cet azote est minéralisé progressivement sous l'action de la flore microbienne (1 à 2% par an) pour se retrouver en fin d'évolution sous forme nitrique (NO_3^-).

Les formes inorganiques rencontrées dans le sol sont constituées par l'azote nitrique (NO_3^-), l'azote ammoniacal (NH_4^+), l'azote gazeux (N_2) et l'oxyde d'azote (NO_2). La fraction d'azote minéral dans le sol représente moins de 5% de l'azote total. L'azote minéral se trouve principalement sous forme d'ammonium et de nitrate.

La forme ammoniacale (NH_4^+) est le résultat de la première transformation de l'azote organique du sol. Cette forme est soluble dans l'eau et bien retenue par le pouvoir adsorbant du sol, elle est transitoire et sera transformée ensuite en azote nitrique.

La forme nitrique (NO_3^-) est la plus mobile dans le sol et par conséquent la plus accessible aux plantes.

L'absorption de l'ammonium ou des nitrates dépend des conditions du milieu. L'ion ammonium peut inhiber l'absorption des nitrates. Lorsque les deux formes sont présentes à des concentrations égales, l'absorption de l'ammonium par les plantules de blé dépasse généralement celle des nitrates. Par ailleurs, l'absorption de l'une ou de l'autre forme dépend de l'espèce et de l'âge de la plantule. Les céréales préfèrent la forme ammoniacale durant les premières phases de leur croissance.

SOMMAIRE

n° 155

Fertilisation des cultures

- Introduction..... p.1
- L'azote..... p.2
- Le potassium..... p.3
- Le phosphore..... p.4

Tableau 1. Les éléments nutritifs, leurs formes d'absorption et leurs fonctions

Élément	Formes d'absorption	Fonctions principales
Azote	NO_3^- , NH_4^+	Constituant des composés principaux des cellules, des protéines, de la chlorophylle et des gènes.
Phosphore	H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}	Constituant des gènes, rôle central dans le transfert d'énergie dans la plante et dans le métabolisme des protéines.
Potassium	K^+	Aide dans la régulation osmotique et ionique; important pour plusieurs fonctions enzymatiques et dans le métabolisme des protéines et des carbohydrates.
Calcium	Ca^{2+}	Impliqué dans la division cellulaire et joue un rôle majeur dans le maintien de l'intégrité de la membrane.
Magnésium	Mg^{2+}	Constituant de la chlorophylle, et facteur dans plusieurs réactions enzymatiques.
Soufre	SO_4^{2-}	Constituant des protéines, des amino-acides et des vitamines. Nécessaire pour la production des plantes à essences.
Fer	Fe^{2+}	Constituant de plusieurs enzymes comme le cytochrome et la ferredoxine impliquée dans la fixation d'azote et la photosynthèse.
Zinc	Zn^{2+}	Nécessaire pour le fonctionnement correct de plusieurs systèmes enzymatiques importants pour la synthèse des acides nucléiques et dans le métabolisme de l'auxine.
Manganèse	Mn^{2+}	Composant de plusieurs enzymes telles que celles impliquées dans la photosynthèse.
Cuivre	Cu^{2+}	Composant de plusieurs enzymes nécessaires pour la photosynthèse.
Bore	H_3BO_3	Rôle important dans la migration et l'utilisation des glucides. Intervient dans la croissance méristématique.
Molybdène	MoO_4^{2-}	Requis pour l'assimilation normale de l'azote. Nécessaire pour la fixation d'azote et pour la chlorophylle.
Chlore	Cl^-	Essentiel pour la photosynthèse et pour la régulation osmotique des plantes qui se développent dans des sols salins.
Nickel	Ni^{2+}	Constituant de l'enzyme uréase chez les légumineuses. Nécessaire pour que les plantes puissent compléter leur cycle de développement.

Romheld et Marshner, 1988

Carence et abondance de l'azote dans la plante

Carence

En situation de carence azotée, les plantes restent chétives, les feuilles se dressent, deviennent plus raides et tourment au vert-clair, le pétiole et les nervures sont plus prononcées à cause du retard de développement des parties succulentes. La déficience en azote chez les graminées se caractérise par un tallage défectueux et une extension anormale du système racinaire par rapport au système aérien. La teneur en protéines est souvent élevée.

Abondance

Les feuilles sont vert-foncées, les plantes sont succulentes et très digestibles et il y a réduction des parties ligneuses. La maturité et par conséquent la récolte sont retardées car l'azote stimule la croissance végétative au détriment des organes de reproduction. En cas d'excès d'azote, les céréales sont sujettes à la verse.

Pratique de la fertilisation azotée

Méthode du bilan

Parmi les méthodes de raisonnement de la fertilisation azotée, il y a la méthode du bilan minéral prévisionnel. En France, le bilan est calculé entre un état initial, représenté par la "sortie de l'hiver", époque pendant laquelle les quantités d'azote minéral dans le sol sont relativement stables et un état final au moment de la récolte de la culture. Il consiste à équilibrer les besoins de la culture par une quantité d'azote disponible, provenant des fournitures du sol et de l'engrais (Tableau 2).

Dans les conditions marocaines, l'application de cette méthode est relativement délicate en raison de la difficulté d'estimer correctement les niveaux de certains paramètres comme l'azote minéral, le lessivage et la dénitrification, en plus de leur variabilité extrême au cours du cycle de la culture.

Minéralisation de la matière organique

La teneur du sol en matière organique conditionne la quantité d'azote issue de la minéralisation. D'autres facteurs agissent sur ce proces-

sus; ce sont la texture, le pH, la présence du calcaire, le précédent cultural et les conditions climatiques de la région. Dans les conditions marocaines, l'azote minéral provenant de la matière organique est variable et se situerait entre 10 et 50 unités d'azote par hectare. La jachère et les engrais verts sont des précédents culturaux qui laissent une quantité appréciable d'azote minéral pour la culture suivante.

Lessivage

L'azote est l'élément le plus exposé au lessivage en raison de sa grande mobilité dans le sol. Les pertes par lessivage sont d'autant plus importantes que:

- Les quantités d'eau (pluie et irrigation) reçues par le sol sont importantes,
- La texture du sol est grossière: l'azote est plus facilement lessivé dans les sols sableux,
- L'engrais apporté est sous forme nitrique. L'urée et le sulfate d'ammoniaque sont moins exposés au lessivage que l'ammonitrate.

Pour tenir compte des pertes par lessivage, il est conseillé de majorer les apports d'engrais de 5 à 30% selon la combinaison des facteurs cités ci-dessus, aggravant ce risque.

Volatilisation

C'est la transformation de l'azote sous forme d'ammonium en ammoniac qui est volatilisé selon la réaction: $\text{NH}_4^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$

Les facteurs qui favorisent ces pertes sont:

- La forme de l'azote choisie: les risques de volatilisation sont plus importants dans le cas de l'urée ou du sulfate d'ammonium.
- Les sols alcalins.
- Les températures élevées.
- Mode d'apport de l'engrais: si l'apport de l'engrais est immédiatement suivi d'un enfouissement et d'une pluie ou irrigation, les pertes sont minimales.

De même, les pertes par volatilisation sont négligeables si on pratique la fertigation.

Pour tenir compte de ces pertes, on applique des majorations des quantités apportées qui peuvent aller jusqu'à 25% selon la combinaison des facteurs ci-dessus favorisant ces pertes.

Dénitrification

Dans les sols lourds, tassés et très humides, peuvent prévaloir des conditions anaérobiques favorisant l'activité des bactéries dénitrifiantes transformant les nitrates en N_2 . Ces conditions sont très limitées au Maroc (cas de certaines terres inondables au Gharb), et les pertes qui en résultent sont faibles (moins de 5%).

Prélèvement d'azote par les cultures

Les quantités prélevées par les cultures dépendent des organes récoltées et exportés. Le tableau 3 donne les quantités totales d'éléments nutritifs prélevés par différentes cultures.



Echelle de couleur des feuilles



Mesure du taux de chlorophylle



Verse du blé

Tableau 2. Bilan minéral de l'azote

Entrées	Unités (N/ha)	Sorties	Unités (N/ha)
1- N minéral: reliquat présent après récolte précédente	(1)	5- N consommé par la culture	(5)
2- N minéral: provenant des résidus de la récolte précédente	(2)	6- N lessivé	(6)
3- N minéral: provenant de la matière organique du sol	(3)	7- N volatilisé	(7)
4- Apport des eaux (pluies ou irrigation)	(4)	8- N dénitrifié	(8)
Total entrées = a = 1+2+3+4		Total sorties = b = 5+6+7+8	
9- N à apporter par la fumure = b - a			

Culture de maïs



Carence en azote

Fertilisation azotée adéquate

Tableau 3. Prélèvement des éléments fertilisants en kg par quintal de récolte pour différentes cultures (SCPA, 1989)

Cultures	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	SO ₂
Blé tendre						
- Grain seul	1,90	1,00	0,60	0,06	0,15	0,75
- Plante entière	2,30	1,20	3,50	0,40	0,25	1,05
Blé dur						
- Grain seul	2,40	1,20	0,60	0,06	0,15	0,75
- Plante entière	3,35	1,70	3,00	0,40	0,25	1,05
Orge, Avoine						
- Grain seul	1,50	0,85	0,75	-	0,18	0,28
- Plante entière	2,00	1,10	2,10	-	0,25	0,55
Riz						
- Grain seul	1,38	0,30	0,32	-	-	3,75
- Plante entière	2,20	0,50	1,75	-	-	-
Maïs grain						
- Grain seul	1,50	0,75	0,5	0,02	0,20	0,50
- Plante entière	2,20	1,00	2,08	0,50	0,45	0,70
Colza						
- Grain seul	3,70	1,50	1,00	0,80	0,40	4,00
- Plante entière	5,30	2,00	9,00	-	1,40	6,80
Betterave						
- Grain seul	0,20	0,10	0,27	0,10	0,06	0,13
- Plante entière	0,60	0,18	0,80	0,20	0,10	0,30
Pomme de terre						
- Tubercules	0,40	0,16	0,60	-	0,03	0,40
- Plante entière	-	0,20	0,85	-	0,04	0,52
Tournesol						
- Grain seul	3,50	1,20	0,85	0,30	0,75	-
- Plante entière	5,50	1,75	11,0	6,40	3,00	3,00

Détermination de la dose optimale

A l'échelle d'une région et pour une culture donnée, la dose optimale d'azote peut être déterminée à partir d'essais dans lesquels la culture donnée a répondu positivement à l'apport d'azote.

La formule suivante a été établie pour le blé (voir BTTA n° 62):

$$\text{Dose de N à apporter (kg N/ha)} = \frac{G \times (R - r)}{\text{CUA}}$$

- G (quantité de N requise pour produire 1 quintal de grain) = 3 kg de N par quintal de grain en irrigué et 3,5 à 4 kg en bour favorable.
- R = Rendement objectif en qx/ha.
- r = Rendement permis par la fertilité propre du sol (témoin sans N) en qx/ha.
- CUA = Coefficient d'utilisation apparent de N de l'engrais. CUA = 60% en irrigué et 50% en bour favorable.

Une formule similaire a été établie pour calculer la dose d'azote optimale pour la fertilisation du tournesol au Gharb (voir BTTA n° 80) où G = 3,47 kg de N par quintal de grain et CUA = 53%.

Le potassium (K)

Le potassium est absorbé par la plante sous sa forme ionique K^+ . Il est essentiel pour la translocation des sucres et pour la formation de l'amidon. Il intervient dans la régulation osmotique et ionique, ainsi que dans le processus d'ouverture et de fermeture des stomates. Le potassium est nécessaire pour plusieurs fonctions enzymatiques et pour le métabolisme des protéines et des carbohydrates.

Formes du potassium dans le sol

Pour raisonner la fertilisation potassique, il est nécessaire de connaître la dynamique du potassium dans le sol ainsi que les modalités de l'alimentation potassique des plantes. Dans le sol, le potassium se trouve sous quatre formes principales de valeur inégale pour la plante. Celles-ci seront traitées ci-après en allant des formes immédiatement disponibles pour la plante à celles qui le sont le moins, soit respectivement: le potassium dans la solution du sol, le potassium adsorbé, le potassium à l'intérieur des réseaux cristallins et le potassium non échangeable.

Le potassium dans la solution du sol

Le potassium dans la solution du sol est directement absorbé par la plante. Cette fraction de potassium est la plus faible et la plus variable dans le sol. La vitesse de réapprovisionnement de la solution du sol en potassium est une caractéristique intrinsèque du sol. Cette capacité est appelée le "pouvoir tampon". Quand les plantes puisent leurs besoins en potassium du sol par absorption racinaire, les sols argileux réapprovisionnement plus rapidement la solution du sol en cet élément que les sols sableux.

Le potassium adsorbé

Il existe un équilibre entre le potassium de la solution du sol et celui qui est adsorbé sur le complexe d'échange cationique, les deux états constituent un tout utilisable pour l'alimentation de la plante: C'est le potassium échangeable ou assimilable.

Le potassium échangeable correspond à la quantité de K^+ de la solution du sol et celle adsorbée au complexe d'échange et qui est extractible avec une solution d'acétate d'ammonium normale et neutre. En utilisant l'acétate d'ammonium, 95% du potassium adsorbé au complexe argileux humique du sol peuvent être extraits. Le potassium échangeable est un très bon indice de la disponibilité du potassium dans les sols marocains.

Le potassium à l'intérieur des réseaux cristallins

C'est le potassium interne qui intervient plus difficilement dans l'alimentation de la plante. En effet, les ions K^+ ne restent pas tous adsorbés à l'extérieur du complexe d'échange, ils peuvent aussi pénétrer à l'intérieur entre les feuillettes d'argile. On dit alors que le potassium est rétrogradé ou fixé sous forme non échangeable. Mais quand le potassium repasse à l'extérieur du complexe, il redevient utilisable par la plante: on dit alors que le potassium est régénéré. Cette forme du potassium peut dans certaines conditions contribuer de manière très significative à l'alimentation des plantes.

Le potassium non échangeable

Les formations cristallines et volcaniques sont généralement riches en potasse (2 à 7% dans les feldspaths du granite), mais cette potasse se trouve sous forme pratiquement insoluble donc inutilisable par la plante. Toutefois, sous l'action des agents atmosphériques et des racines, une petite fraction pourrait être mise à la disposition des plantes.

Carence et abondance du potassium dans la plante

Les symptômes visuels de déficience se caractérisent par des nécroses sur les feuilles les plus âgées. Une carence en potassium se montre clairement par une couleur vert foncée et des troubles d'évaporation dus à un fonctionnement défectueux de la régulation stomatique.

Sur céréales, les symptômes de carence se remarquent par un jaunissement de la pointe des feuilles. Sur maïs, on observe une ondulation de la feuille avec couleur plus claire. Sur pomme de terre, les folioles se courbent vers le dessous avec coloration vert bleue autour des nervures, puis brune au bord des feuilles. Sur vigne on remarque une coloration d'abord violacée des feuilles.

Les apports massifs de potassium ainsi que des teneurs du sol en potassium trop élevées peuvent induire des carences en magnésium et en calcium.

Pratique de la fertilisation potassique

Dose

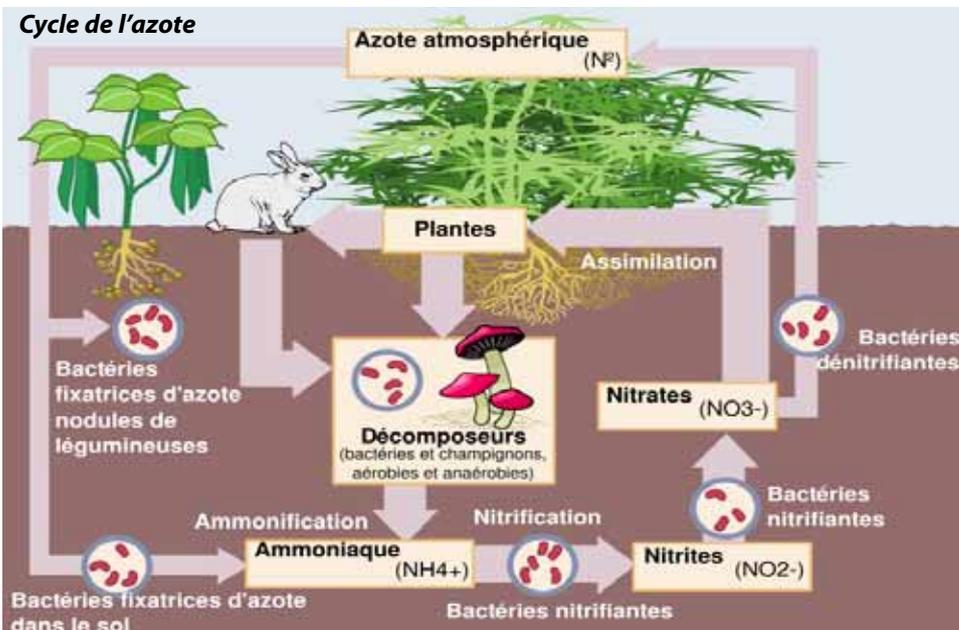
Le raisonnement de la fertilisation potassique diffère selon que l'on dispose ou non de l'analyse chimique du sol. Pour les sols pauvres en potassium, la fumure potassique est la somme arithmétique de la fumure de redressement et de la fumure d'entretien.

La fumure de redressement représente la quantité d'engrais à fournir au sol pour relever sa richesse à un niveau satisfaisant. La quantité à apporter pour combler un déficit de 10 ppm s'élève à environ 50 unités/ha. La fumure d'entretien est le produit du rendement escompté et la quantité de potassium exportée par unité de rendement (Tableau 3). En plus, il faudrait majorer la valeur obtenue pour tenir compte du pouvoir fixateur du sol qui est d'autant plus important que les sols sont argileux.

Si l'on ne dispose pas d'une analyse de sol, la fumure potassique est réduite au calcul de la dose d'entretien, ce qui pourrait engendrer des risques, à savoir:

- Sur-fertiliser un sol bien pourvu, et par conséquent augmenter inutilement les charges.
- Sous-fertiliser un sol pauvre et contribuer davantage à son appauvrissement.

Si l'on dispose des analyses de sol, la dose sera déterminée sur la base des recommandations du laboratoire d'analyse.



Symptômes de carence en potassium (maïs)



Symptômes de carence en potassium (soja)

Date d'apport

Les meilleurs résultats sont obtenus, quand on procède à l'enfouissement des engrais au moment des travaux préparatoires des sols, surtout dans le cas des sols pauvres. En sol riche, la date d'apport est moins cruciale et on peut même appliquer l'engrais en couverture lorsqu'on utilise des engrais composés. Dans ce cas, la date d'application doit être raisonnée en fonction de l'azote.

Le phosphore (P)

Le phosphore dans le sol

Dans le sol, le phosphore est présent sous plusieurs formes:

- Le phosphore de la roche mère (non assimilable par les plantes);
- Le phosphore de la phase solide (disponible aux plantes au cours d'un cycle de culture). Cette forme a une plus grande solubilité que le phosphore de la roche mère;
- Le phosphore de la solution du sol qui peut être utilisé immédiatement par les plantes.

Trois ions phosphore existent: $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} , PO_4^{3-} . Ce dernier ne se rencontre en quantité notable qu'aux valeurs élevées du pH. La plante absorbe le phosphore sous forme $H_2PO_4^-$ ou HPO_4^{2-} , selon le pH du sol.

Le phosphore insoluble des roches mères

Il représente la très grande majorité du phosphore total du sol, forme quasiment inutilisable par la plante. Mais, c'est la réserve générale à partir de laquelle une petite fraction parviendra au bout de la chaîne dans les solutions du sol, à la suite de nombreuses et lentes transformations de nature physico-chimiques ou biotiques.

Le phosphore lié aux constituants organiques

Dans ce cas, le phosphore se trouve engagé dans des structures moléculaires organiques plus ou moins stables et non assimilables par la plante. L'humus intervient dans l'alimentation phosphorique en limitant l'évolution de l'acide phosphorique vers des formes plus difficilement assimilables par le végétal, notamment en sol calcaire.

Le phosphore lié aux constituants minéraux

Les ions phosphoriques peuvent être fixés sur le complexe argilo-humique, particulièrement sur les argiles. L'augmentation de la teneur en argile diminue le coefficient de diffusion du phosphore à cause de l'augmentation des sites d'adsorption à la surface des particules. Le P_2O_5 adsorbé ne représente qu'une faible partie du phosphore total. Il constitue la majeure partie du phosphore assimilable ou échangeable qui, suivant les sols peut atteindre 300 à 500 Kg/ha.

Dans les sols calcaires, les ions phosphore solubles s'insolubilisent très progressivement sous forme de phosphates tricalciques et pour une faible part sous forme d'apatite.

Le phosphore de la solution du sol

C'est la fraction du phosphate total la plus faible et en même temps la plus importante pour l'alimentation de la plante. Le phosphore se trouve sous les deux formes $H_2PO_4^-$ et HPO_4^{2-} qui sont dominantes dans la solution du sol. La solubilité des minéraux de phosphore et la concentration des sols en $H_2PO_4^-$ et HPO_4^{2-} sont fortement dépendantes du pH. L'ensemble des deux dernières formes de phosphore (celui de la solution du sol et celui adsorbé sur le complexe) représente le pool alimentaire qui constitue la fraction du phosphore total considéré comme la

principale réserve alimentaire. Elle correspond au phosphore assimilable ou échangeable.

Symptômes de carence et d'abondance du phosphore dans la plante

Carence

La déficience en phosphore engendre un ralentissement de la croissance des plantes et une coloration pourpre dans les feuilles qui commencent surtout dans les feuilles âgées. La carence en phosphore peut se présenter sous un état bénin ou un état aigu. L'état bénin se manifeste par une réduction générale de la croissance; la plante est plus élancée, le pétiole s'allonge, les nervures sont plus prononcées et les feuilles sont minces et se dressent. A l'état aigu, les feuilles jaunissent et se nécrosent avec un brunissement roux (non bronzé comme dans la carence potassique). Chez les céréales, les carences se manifestent parfois par des colorations pourpres ou violacées sur les bords du limbe, sur le pétiole, sur l'ensemble de la feuille ou sur la tige (cas typique du maïs au stade jeune).

Abondance

Bien qu'on observe rarement des symptômes d'excès en phosphore dans la nature, cet excès se manifeste par une croissance limitée et un jaunissement chlorotique général. En présence de très hautes teneurs foliaires en phosphore (de l'ordre de 1 à 3% dans la matière sèche), on observe pour le blé un flétrissement progressant de la pointe vers la base des feuilles. Pour le trèfle, le soja, l'avoine et l'orge, des nécroses blanc-gris à la pointe et à la périphérie des feuilles, parfois de simples pointes ou taches.

Pratique de la fertilisation phosphatée

Dose

En l'absence d'analyse de terre, la dose à apporter correspond à la fumure calculée à partir du rendement objectif et des exportations de la culture (Tableaux 3).

Un coefficient de majoration est appliqué à la fumure d'entretien pour tenir compte des pertes dues à l'insolubilisation et à la rétrogradation en sol riche en carbonates, en matière organique et en argile. Dans le cas des sols calcaires, il est conseillé de forcer les doses de 30% environ pour tenir compte de la lente rétrogradation, et la fumure de redressement est calculée en tenant compte de la richesse du sol sur la base de 50 unités par 10 ppm de P_2O_5 .

Quand on dispose des analyses de sol, le calcul de la dose de phosphore intègre la richesse du sol en P_2O_5 , sa richesse en calcaire et en matière organique ainsi que la teneur en argile.

Modalités d'apport

Les modes d'apport et de fractionnement varient selon le type de sol, le niveau de richesse chimique et le pouvoir fixateur, et selon les stades de forts besoins de la culture.

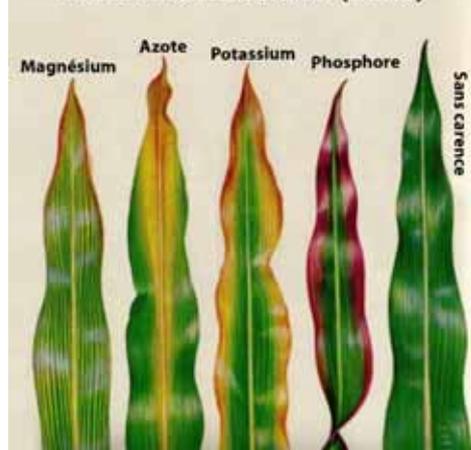
- Dans le cas de sols pauvres, surtout si le pouvoir fixateur est élevé, on a intérêt à mettre une partie au moins de la fumure sous forme soluble au dernier moment et localisée sur les lignes de semis, quand c'est possible.

- S'il s'agit de plantes très exigeantes (Tableau 4) et à croissance rapide (cultures maraîchères), on a intérêt à apporter une partie de la fumure sous forme soluble au moment du semis, même en sol à teneur correcte ■.

Tableau 4. Classement des cultures selon leur exigence en phosphore (Castillon et Bouthier, 1993)

Niveau d'exigence	Cultures
Très exigeantes	Tournesol, colza, luzerne, soja
Moyennement exigeantes	Blé dur, maïs ensilage, orge, ray-gras, pois, sorgho
Peu exigeantes	Avoine, blé tendre, maïs grain, seigle

Symptômes de carences en éléments minéraux (Maïs)



Symptômes de carence en phosphore (maïs)



Symptômes de carence en phosphore (tomate)



Symptômes de carence en phosphore (coton)



Prof. Ali Chafai ELALAoui

Ecole Nationale d'Agriculture de Meknès