

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mohamed Boudiaf - M'sila
Faculté des Sciences
Département des Sciences Agronomiques



Polycopié de Cours

Sol fertilisation et amendement

Spécialité : Sciences du sol

Niveau d'étude : Master 2

Dr. KADRI Adel

Année universitaire : 2020 / 2021

Avant-propos

Ce polycopié est rédigé à l'intention des étudiants de la deuxième année master sciences du sol, de la Faculté des Sciences, Département des sciences agronomiques. Il représente un manuel de cours et d'exercices dans le domaine de la fertilisation et d'amendement des sols. Le cours est structuré de tel sorte que l'étudiant puisse comprendre d'une manière simple et progressive toutes les étapes indispensables pour raisonner un plan de fertilisation pratique et efficace.

Ce polycopié est structuré en quatre sections comme suit :

Dans la première section, nous avons donné les notions de base sur la disponibilité des éléments nutritifs et la manière dont ils sont fixés dans le sol ainsi que les différents mécanismes de transport de ces éléments vers les racines des plantes.

La deuxième section commence par décrire les lois théoriques qui régissent la fertilisation puis explique les méthodes utilisées dans le raisonnement de la fertilisation des trois éléments majeur (N.P.K). Pour chaque élément majeur une explication a été faite sur son importance physiologique pour la plante ainsi que son comportement dans le sol ou dans la solution du sol.

La troisième et quatrième section sont consacrées respectivement aux amendements organiques et minérales. Après explication de leurs bienfaits sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, nous avons expliqué comment les évaluer et contrôler leur évolution.

Nous trouverons en fin dans ce manuscrit quelques exercices corrigés et non corrigés, et nous donnons également une liste de références bibliographiques.

Table des matières

1. Introduction	1
2. Cadre general	2
2.1. Disponibilité des éléments minéraux	2
2.1.1. Dissous dans la solution de sol	2
2.1.2. Maintenus à la surface du sol	2
a- Eléments nutritifs retenus par le complexe argilo-humique et capacité d'échange cationique	3
b- Eléments nutritifs fixés à la matière organique	4
c- Eléments nutritifs retenus comme composés insolubles	4
d- Eléments nutritifs fixés dans les argiles	4
2.1.3. Transport des éléments nutritifs vers les racines	4
a- Interception racinaire	6
b- Écoulement de masse	6
c- Diffusion	7
3. Raisonnement de la fertilisation	8
3.1. Notion de fertilité	8
3.2. La fertilisation	8
3.3. Les matières fertilisantes	8
3.4. Lois de fertilisation	9
3.4.1. Loi des restitutions	9
a. Le lessivage	10
b. La rétrogradation	10
c. La consommation de luxe	10
3.4.2. Interactions et loi des facteurs limitants	10
a. Facteur limitant	10
b. Interaction	10
3.4.3. Loi des accroissements de rendements moins que proportionnels	11
3.5. Raisonnement de la fertilisation azotée	12
3.5.1. Rôles agronomiques de l'azote	12
3.5.2. Comportement de l'azote dans les sols	12
a. L'azote organique	12
b. L'azote ammoniacal (NH_4^+)	13

c. L'azote nitrique (NO_3^-)	13
3.5.3. Bilan azoté et calcul de la fumure	13
- Méthode du bilan	14
3.5.4. Les engrais azotés	16
3.5.5. Fractionnement des apports	17
3.6. Raisonement de la fertilisation phospho-potassique	17
3.6.1. Le phosphore	17
a. Rôle agronomique du phosphore	17
b. Le phosphore dans le sol	18
c. Les engrais phosphatés	18
3.6.2. Le potassium	19
a. Rôle agronomique du potassium	19
b. Le potassium dans le sol	20
c. Les engrais potassiques	20
3.6.3. Principes des fertilisations phosphatées et potassiques	20
a. Exigences des cultures	21
b. Teneur du sol en P et en K	22
c. Passé récent de fertilisation	23
d. Résidus de récolte du précédent	24
3.6.3.1. Calcul de la fertilisation	24
4. Les amendements organiques	26
4.1. Rôles de la matière organique dans la fertilité du sol	26
a. Action sur les propriétés physiques du sol	27
b. Action sur les propriétés chimiques du sol	27
c. Action sur les propriétés biologiques	27
4.2. L'humification, la minéralisation de l'humus et le bilan humique	27
4.2.1. L'humification	28
4.2.2. La minéralisation de la matière organique	28
4.2.3. Le bilan humique	29
4.3. Principaux amendements organiques	30
4.3.1. Le fumier de ferme	31
4.3.2. Les pailles de céréales enfouies	31
4.3.3. Les engrais verts	31

5. Les amendements minéraux	32
5.1.Amélioration des propriétés physiques des sols	32
5.2.Amélioration des propriétés chimiques des sols	32
5.3.Effets sur les propriétés biologiques	33
5.4.Description des amendements	33
5.5.Conditions d'application	34
a. Epannage - Enfouissement	34
b. Modalités d'épannage	34
c. Calcul des doses à épandre	34
Références bibliographiques	35
Travaux dirigés	37
Table des matières	
Annexes	

Liste des tableaux

Tableau 1 : CEC typiques des textures de sol et de la matière organique.....	4
Tableau 2 : Importance relative des éléments nutritives chez le maïs et la manière de leur déplacement vers les racines.....	5
Tableau 3 : Effets de l'interaction entre l'azote et le phosphore sur le rendement d'une culture.....	11
Tableau 4 : Besoins totaux en azote de Quelques cultures.....	15
Tableau 5 : Catégories d'engrais azotés et principaux engrais.....	17
Tableau 6 : Principaux engrais phosphatés (des plus solubles aux moins solubles)	19
Tableau 7 : Exigences en phosphore (P) et en potassium (K) de quelques cultures.....	21
Tableau 8 : les différents cas rencontrés après analyse du P et du K et les conseils de fertilisation correspondants.....	23
Tableau 9 : Détermination des coefficients multiplicateurs pour le calcul des doses de P_2O_5 à apporter (kg/ha) suivant la teneur du sol.....	24
Tableau 10 : Détermination des coefficients multiplicateurs pour le calcul des doses de K_2O à apporter (kg/ha) suivant la teneur du sol.....	25
Tableau 11 : Valeurs indicatives de quelques caractéristiques de matières organiques utilisées en agriculture.....	30

Liste des figures

Figure 1 : Echanges de cations entre la solution du sol et les racines	3
Figure2 : Mouvement des éléments nutritifs dans le sol	5
Figure 3 : Zone des poils absorbants	6
Figure 4 : Ecoulement de masse	6
Figure 5 : Evolution du rendement en fonction des apports azotés	12
Figure 6 : Raisonnement de la fumure phosphaté et potassique à partir des valeurs seuils	22
Figure 7 : Fixation des ions phosphoriques sur l'argile et l'humus par l'intermédiaire du calcium.....	33

Liste des annexes

Annexe 1 : Tableau des teneurs « impasse » et « renforcée » en P_2O_5 et K_2O en fonction du type de sol et de l'exigence des cultures

Annexe 2 : Exportations de P_2O_5 de quelques cultures

Annexe 3 : Exportations de K_2O de quelques cultures

1. Introduction

Selon les prévisions des Nations Unies, la population mondiale devra atteindre les 9.7 milliards d'individus en 2050 (FAO, 2017). Répondre aux besoins croissants de la population mondiale en production agricole dans les années à venir, constitue un véritable défi au secteur agricole. En effet, Les surfaces agricoles ayant atteint leur limite dans de nombreux pays, cette augmentation ne pourra se faire que par une augmentation conséquente des rendements. La production agricole devra alors être significativement plus élevée tout en préservant l'environnement et les ressources naturelles.

L'augmentation des rendements a pu se faire ces dernières décennies, essentiellement par l'amélioration variétale et les techniques culturales associées, dont la fertilisation. En effet, Les plantes prélèvent des éléments nutritifs dans le sol pour assurer leur croissance et leur développement. Cependant, il est nécessaire de renouveler ce stock régulièrement au moyen de diverses méthodes qui peuvent être complémentaires (apport d'engrais organiques ou minéraux). L'amélioration de la nutrition des plantes est nécessaire à l'expression des géotypes à haut potentiel de rendement.

Ainsi, une meilleure nutrition des plantes grâce à une fertilisation raisonnée peut permettre une augmentation des rendements tout en préservant les sols et les ressources naturelles. L'utilisation des engrais doit être effectuée de façon adéquate pour protéger l'environnement et restituer au sol les ressources exportées par la plante. En effet, une sous-utilisation des engrais donnera lieu à une baisse des rendements des cultures et par-là, des profits des agriculteurs, alors qu'un apport excessif d'engrais ne constitue pas une pratique de gestion optimale puisqu'elle ne tient pas compte des coûts, des profits et des effets sur l'environnement.

L'objet de ce cours est de permettre de planifier et d'appliquer une stratégie de gestion des éléments nutritifs et d'utiliser judicieusement les engrais tout en protégeant l'environnement.

2. Cadre général

Pour se développer, les plantes prélèvent dans le milieu qui les entoure (air, eau, sol) les 18 éléments nécessaires à leur vie et à leur développement. Les 3 éléments C, H, O représentent 98 % de la biomasse d'une plante. Les 6 éléments de structure et macro éléments restants : N, P, K sont dit éléments majeurs ; Ca, Mg, S sont couramment appelés éléments secondaires. Dans les 2 cas, majeurs et secondaires, ils sont absorbés en quantité importantes, avec des teneurs supérieures au g/kg MS d'une plante. Les éléments majeurs ont toutefois des teneurs plus importantes que les secondaires. Les 9 autres sont appelés les oligo-éléments et ont des teneurs de l'ordre du mg ou du dixième de mg/kg de MS des plantes.

2.1. Disponibilité des éléments minéraux

Les éléments nutritifs se présentent sous différentes formes dans le sol, parviennent aux racines par différents moyens et jouent chacun des rôles précis dans la biologie végétale. Les éléments nutritifs sont retenus de différentes façons par les particules du sol.

2.1.1. Dissous dans la solution de sol

Les éléments solubles dissous dans l'eau proviennent de la décomposition de la roche-mère et des matières organiques. Il s'agit des ions : Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , H_3O^+ , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , CO_3^{3-} , NO_3^- , etc.

Seuls les éléments nutritifs dissous dans la solution de sol peuvent être absorbés par les racines des végétaux, mais la plupart des éléments nutritifs ne sont présents qu'en petite quantité à la fois dans la solution de sol (eau du sol). À mesure que les éléments nutritifs sont prélevés de la solution de sol et assimilés par les végétaux, ils sont remplacés par des éléments nutritifs présents sous d'autres formes.

2.1.2. Maintenus à la surface du sol

La plupart des éléments nutritifs sont présents dans la solution de sol sous forme d'ions chargés soit négativement (anion), soit positivement (cation). Les éléments nutritifs s'ils ne sont pas libres dans la solution du sol sont présents soit sous forme :

Adsorbés sur le complexe argilo-humique, facilement échangeables avec la solution ;

Rétrogradés c'est-à-dire fixés entre les feuillets d'argile, et donc difficilement échangeables ;

Associés à des molécules organiques avec lesquelles ils forment des chélates (association entre un élément minéral et un constituant organique), facilement échangeables ;

Inclus dans les molécules organiques, insolubles

a- Eléments nutritifs retenus par le complexe argilo-humique et capacité d'échange cationique

Les colloïdes du sol (argiles et matière organique) ont une charge dominante négative qui permet de retenir des cations positivement chargés. Le nombre de cations qui peuvent être retenus, et par conséquent échangés, est égal à la quantité de charges négatives. Cette quantité est appelée la capacité d'échange cationique (CEC). Elle s'exprime en centimoles de charge positive par kilogramme de sol (cmol/kg). L'importance de la CEC dépend de la texture du sol, des types de minéraux présents et du pourcentage de matière organique. Plus la texture devient fine, plus la surface de contact augmente pour chaque gramme de sol.

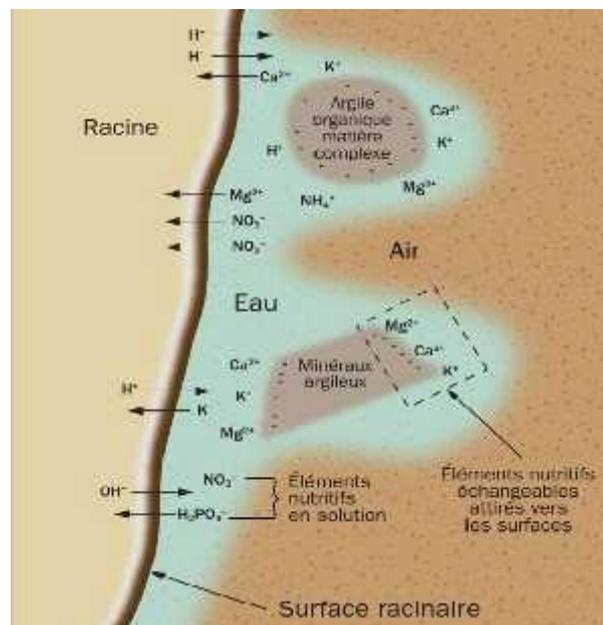


Figure 1 : Echanges de cations entre la solution du sol et les racines (Source : Munroe, 2018)

Lorsque les cultures prélèvent des éléments nutritifs et les extraient ainsi de la solution de sol, il se produit un déplacement net hors de la surface des particules de sol jusqu'à ce que l'équilibre entre la solution et le sol soit rétabli (figure 1).

Tableau 1 : CEC typiques des textures de sol et de la matière organique

Matière	CEC (cmol/kg)
Sol sableux	2-10
Sol limoneux	7-25
Sol argileux	20-40
Matière organique	200-400
Terre noire > 20 % de matière organique	25-100

(Source : Munroe, 2018)

b- Eléments nutritifs fixés à la matière organique

La matière organique présente dans le sol se compose de résidus de culture, de microbes et de matériaux organiques parvenus à divers stades de décomposition. Les éléments nutritifs assimilables par les végétaux sont retenus à l'intérieur de cette matière organique et adsorbés sur ses surfaces.

c- Eléments nutritifs retenus comme composés insolubles

Plusieurs éléments nutritifs réagissent fortement avec d'autres minéraux du sol, afin de former des composés insolubles ou légèrement solubles. Le meilleur exemple est le phosphore. Le phosphate se lie avec du fer ou de l'aluminium dans les sols acides ou avec du calcium ou du magnésium dans les sols alcalins afin de former des composés insolubles. Le phosphate réagit également avec les oxydes de fer et d'aluminium dans le sol, formant des composés qui sont seulement légèrement solubles

d- Eléments nutritifs fixés dans les argiles

Les illites ont entre leurs couches des espaces qui correspondent étroitement à la taille d'un ion potassium. Quand ces sols reçoivent des apports de potassium, les ions peuvent se trouver emprisonnés dans l'argile, une fois qu'ils se sont logés dans ces espaces et que les couches argileuses se sont effondrées sur eux. Les éléments nutritifs ainsi fixés sont peu à peu assimilables par les végétaux. Ils ne sont pas directement échangeables, mais se libèrent graduellement à mesure que les minéraux argileux sont météorisés ou dégradés par ressuyage, humectation, gel ou dégel extrême.

2.1.3. Transport des éléments nutritifs vers les racines

Pour que les éléments nutritifs soient absorbés dans un végétal, ils doivent être dans la solution de sol et à proximité de la surface des racines. Les éléments nutritifs dans la solution de sol se dirigent vers les

racines par trois processus : l'interception racinaire, le débit massique et la diffusion. La contribution relative de chacun de ces processus est présentée dans le tableau 2.

Tableau 2 : Importance relative des éléments nutritives pour le maïs et la manière de leur déplacement vers les racines

Élément nutritif	Quantité nécessaire pour 9,4 t/ha (150 boiss./ac) de maïs	Pourcentage fourni par		
		Interception racinaire	Débit massique	Diffusion
Azote	170	1	99	0
Phosphore	35	3	6	94
Potassium	175	2	20	78
Calcium	35	171	429	0
Magnésium	40	38	250	0
Soufre	20	5	95	0
Cuivre	0,1	10	400	0
Zinc	0,3	33	33	33
Bore	0,2	10	350	0
Fer	1,9	11	53	37
Manganèse	0,3	33	133	0
Molybdène	0,01	10	200	0

(Source : Munroe, 2018)

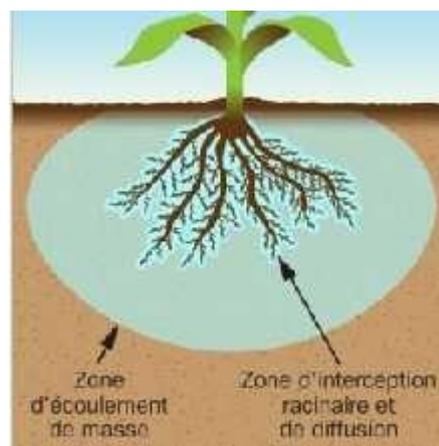


Figure2 : Mouvement des éléments nutritifs dans le sol (Source : Munroe, 2018)

a- Interception racinaire

L'interception racinaire se fait par déplacement de la racine vers l'élément nutritif. Par chimiotropisme, les racines des plantes, peuvent se déplacer vers les endroits qui sont les plus riches en éléments nutritifs. Les ions nutritifs sont prélevés par contact direct avec la racine ou toute mycorhize qui y est associée (figure 3). Cependant, cette interception racinaire ne jouerait pas un rôle très important et ne dépasserait pas 2 % des besoins totaux.

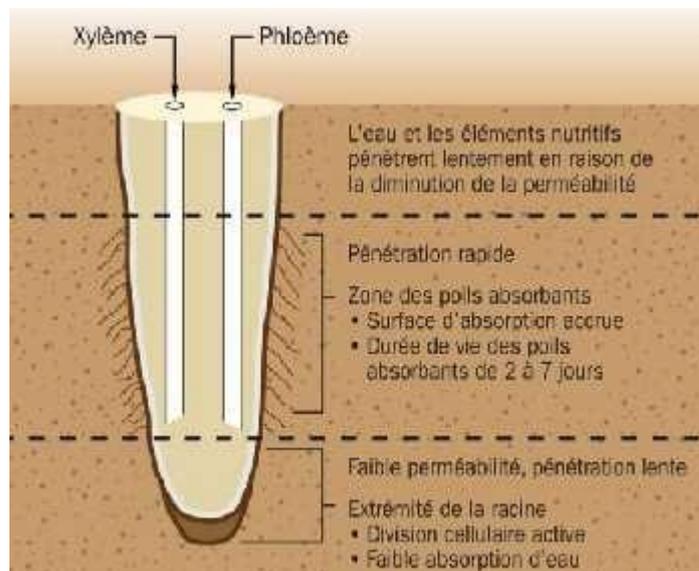
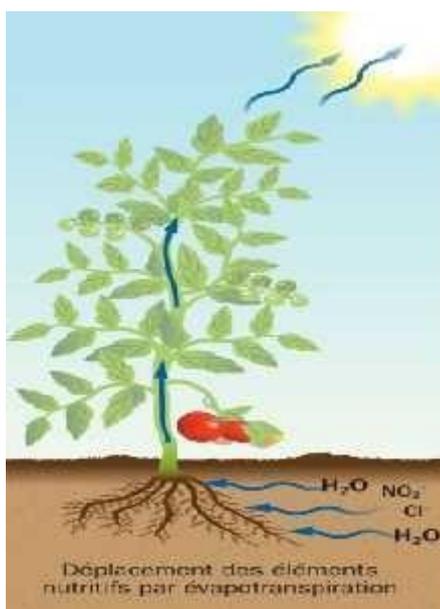


Figure 3 : Zone des poils absorbants (Source : Munroe, 2018)

b- Écoulement de masse



Il s'agit des éléments minéraux présents dans la solution du sol, qui sont adsorbés par le courant de transpiration (figure 4). En effet, Lorsqu'un végétal prélève l'eau du sol, l'eau transporte les éléments nutritifs en solution vers les racines. L'utilisation de l'eau par la plante et la concentration d'éléments nutritifs dans l'eau du sol déterminent la quantité d'éléments nutritifs qui atteignent la plante. Il s'agit du principal mode de transport des éléments nutritifs en solution, tels que nitrates, sulfates, chlorures, bore, calcium et magnésium.

Figure 4 : Ecoulement de masse (Source : Munroe, 2018)

c- Diffusion

La diffusion a lieu lorsqu'un ion est transporté d'une concentration plus élevée vers une concentration moins élevée. Il y a diffusion lorsque la concentration au niveau de la surface racinaire est, soit plus élevée, soit plus basse que celle de la solution environnante.

Les éléments nutritifs dans des concentrations plus élevées dans la solution de sol se diffusent vers la zone où la concentration est plus faible, soit les racines (figure 2). Ce processus est influencé par les besoins des végétaux ainsi que par la texture et la teneur en eau et en éléments nutritifs du sol. La diffusion est le principal mode de transport du phosphore et du potassium. Elle est lente dans la plupart des conditions de sol et ne survient que sur des distances extrêmement faible

