Chapitre 3: Les propriétés chimiques, biologiques et fertilité du sol

3-1- Les propriétés chimiques de base des sols

Le sol possède plusieurs propriétés chimiques dont les plus importantes sont de l'ordre de deux: le pH et la CE et aussi la CEC.

3-1-1- Le pH du sol

3-1-1-1-Définitions

Le pH du sol représente la mesure ou la détermination du degré d'acidité ou d'alcalinité d'un sol. C'est la mesure du nombre (concentration) d'ions d'hydrogène (H+) présents dans la solution du sol.

Le pH est mesuré sur une échelle logarithmique de 0 à 14. C'est le logarithme négatif de la concentration d'ion H^+ libre d'une solution (dans notre cas dans la solution du sol), on l'exprime par la formule suivante:

$pH = -\log [H^+]$

Un pH de 7,0 est considéré comme neutre.

*Plus le chiffre est élevé, moins le sol est acide ou plus il est alcalin;

*Plus le chiffre est bas, plus le sol est acide.

3-1-1-2-Méthodes de détermination (mesure) du pH du sol et interprétations

Pour un sol, le pH nous informe sur une des propriétés les plus importantes (comportement) car elle guide par son changement en fonction des conditions du milieu toutes ces (sols) propriétés chimiques, biologiques et physiques.

De point de vue pH, le sol ne se comporte pas de la même manière que l'eau, on parle de ce qu'on appelle **pouvoir tampon** (**lié à la présence des colloïdes (responsables en grande partie de la CEC du sol),** il s'agit d'une capacité particulière qu'a le sol de s'opposer aux changements brusques (acidité ou alcalinité brusque du pH).

On peut déterminer (mesurer) le pH de notre sol par plusieurs méthodes de terrain (approximatives) et au laboratoire (précise).

****Sur terrain**, on peut déduire approximativement le pH de notre sol soit par l'utilisation **des indicateurs colorés** à 25°C qui nous donne seulement l'intervalle du pH, on cite l'Hélianthine (de couleur jaune jusqu'au pH près de 3 et rouge dans une solution de supérieur pH à 3,5), Bleu de Bromothymol (de couleur jaune jusqu'au voisinage de 6 et 6,5, une zone virage verte 6,5 à peu près 7 et couleur bleu à partir de plus de 7) et aussi Phénolphtaléine qui est incolore jusqu'au pH à peu près de 8 puis devient rose.

Aussi, on peut sous-poudrer du bicarbonate sur le sol et si on remarque une effervescence c'est que notre sol est acide.

****Au laboratoire,** on utilise la méthode électro-métrique (par utilisation du pH mètre, déjà utilisée au Tp2)

Lorsqu'on parle de la mesure de l'acidité d'un sol, on distingue entre l'acidité réelle ou actuelle et l'acidité potentielle.

L'acidité actuelle (pH eau) : c'est la quantité (concentration) des ions H^+ libres d'une suspension sol/eau de 1/ 2.5 ou 1/ 5. Les ions H^+ libre de la suspension sont en équilibre avec les ions H^+ fixés sur le complexe d'échange, les mesures se font à l'aide du pH mètre.

L'acidité potentielle ou (pH KCl) : c'est la quantité (concentration) d'ions H^+ libre d'une suspension sol/KCl N de 1/ 2.5 ou 1/ 5. Elle tend à mesurer la masse des ions H^+ échangeables.

<u>Interprétation</u> :

pH $_{eau}$: (Baize, 1988)

pH inférieur à 3.5 → hyper-acide

pH entre 3.5 et 5 → très acide

pH entre 5 et 6.5 → acide

pH entre 6.5 et 7.5 → neutre

pH entre 7.5 et 8.7 → basique

pH supérieur à 8.7 → très basique

Autre interprétation du pH eau :

Tableau 1 : Echelle d'interprétation du pH du sol

PH_{eau}	< 5.5	5.5 – 6	6 -7	7 - 8	> 8
Interprétation	Forte acidité	Acidité légère	Très légère acidité	alcalinité	Forte alcalinité

La différence entre le pH eau et le pH KCl est d'autant plus élevée que le sol est dé saturé :

Tableau 2 : Echelle d'interprétation de la différence entre le pH $_{eau}$ et le pH $_{KCl}$

pH_{eau} - pH_{KCl}	< 0.5	0.5 -------- 1	> 1
Interprétation	Sol faiblement dé saturé	Sol dé saturé	Sol fortement dé saturé

Le La différence entre le pH eau et le pH KCl est d'autant plus élevée que le sol est désaturé

3-1-1-3-Importance agronomique de la connaissance du pH du sol

La connaissance du pH d'un sol est importante pour plusieurs raisons :

***La disponibilité des éléments nutritifs**

Le pH d'un sol nous informe de façon générale sur **sa productivité**, il influe grossièrement la disponibilité des éléments nutritifs (**voir figure 1**) qui a son tour influe la nutrition minérale des végétaux et des organismes vivants des sols.

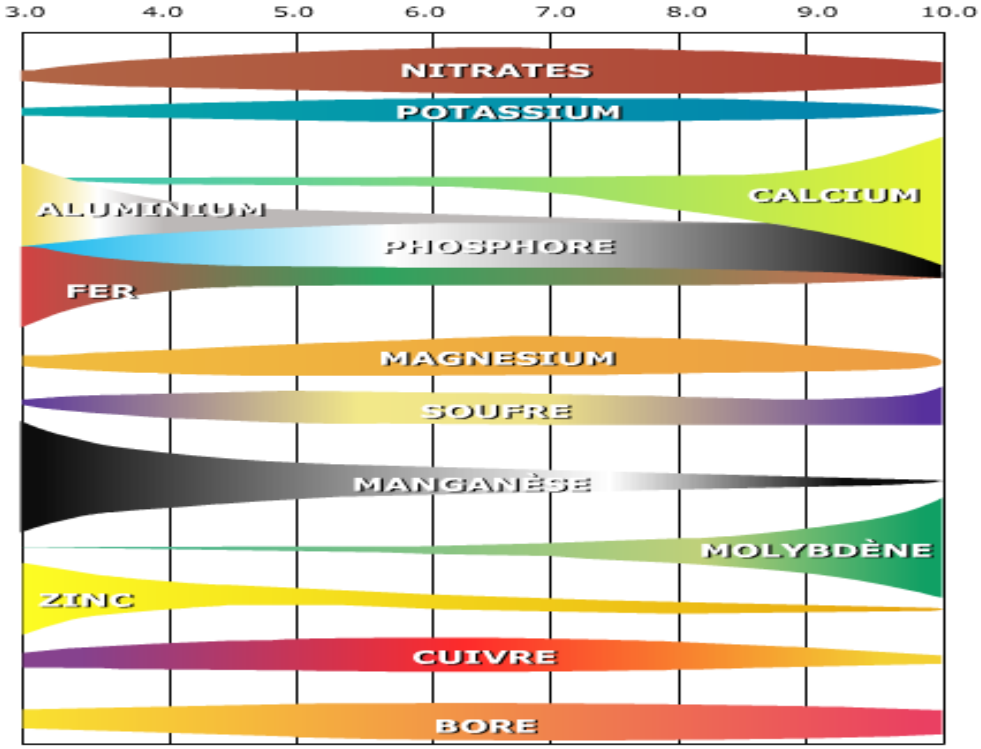

Figure 1 : pH et disponibilité des éléments nutritifs

Le meilleur exemple est le phosphore. Dans les sols acides, le phosphore se complexe avec le Fer et devient insoluble. Dans les sols basiques, il se complexe avec le calcaire. Il peut donc avoir du phosphore dans le sol, mais ce phosphore est non prélevable. Il devient soluble et donc assimilable dès que le pH est ajusté vers la neutralité. Faire un apport de phosphates sur un sol acide ou basique est donc une perte puisque les phosphates se rétrogradent assez rapidement.

Donc, il est impossible de gérer la fertilité chimique d'un sol sans gérer le pH en même temps.

Généralement la majorité des plantes cultivées poussent sur des sols de pH entre 6 et 7.5 à 8 **(figure 2)**.

Il est à noter aussi que Le pH idéal au développement du végétal dépend de l'espèce végétale en lui même ; c'est pourquoi l'on regroupe les plantes en diverses catégories (**plantes acidophiles** qui se développent mieux sur des sols acides à pH du sol compris entre 4,0 et 6,5), **plantes alcalinophiles** qui s'adaptent mieux sur des sols basiques à pH du compris entre 7,5 et 9,0 et **des plantes neutrophiles** qui ont une prédilection pour le sol neutre (pH du sol est compris entre 6,5 et 7,5)).

Le meilleur exemple est le phosphore. Dans les sols acides, le phosphore se complexe avec le Fer et devient insoluble. Dans les sols basiques, il se complexe avec le calcaire. Il peut donc avoir du phosphore dans le sol, mais ce phosphore est non-prélevable. Il devient soluble et donc assimilable dès que le pH est ajusté vers la neutralité. Faire un apport de phosphates sur un sol acide ou basique est donc une perte puisque les phosphates se rétrogradent assez rapidement.

Donc, il est impossible de gérer la fertilité chimique d'un sol sans gérer le pH en même temps.

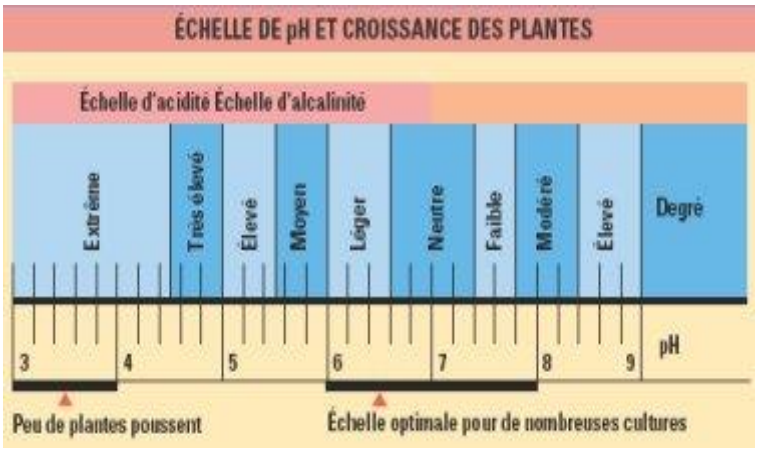

Figure 2: Echelle de pHet croissance des plantes.

***Les problèmes de toxicité**

Contrairement aux éléments nutritifs, les métaux sont plus solubles et donc assimilables à des pH acides. L'exemple le plus courant est une toxicité par l'Aluminium. Dans les pH plus élevés, l'Aluminium est non soluble et donc n'entre pas dans la solution du sol. Dès qu'il est en solution, il est prélevé avec les autres cations/anions et peut être toxique.

3-1-2-La CE (conductivité électrique)

3-1-2-1-Définitions

La solution du sol a une importance capitale dans la nutrition minérale des plantes. Elle se caractérise souvent par sa composition et ses propriétés électrochimiques : pH, CE,…..

La conductivité électrique (CE) d'une solution est la conductance de cette solution mesurée entre deux électrodes de 1cm^2 de surface, elle est fonction de sa concentration en électrolytes qui assurent le passage du courant électrique par les ions.

Dans un sol, la CE dépond de la concentration et de la nature des électrolytes et la T° (car elle agit sur l'activité des ions).

La mesure de la CE d'un sol permet d'obtenir rapidement une estimation **de la teneur globale en sels dissout** (chlorures, sulfates, carbonates, bicarbonates……), exprimée en mmhos/cm^2 à 25°C.

3-1-2-2-Mesure de la CE d'un sol

On mesure la CE d'un sol dans sa solution (solution du sol), celle dernière peut être acquise à partir de l'extrait de pate à saturation ou extrait 1/5 (extrait 1/5 est la plus utilisée) et parfois sur des extraits 1/1, ½ et1/10 le chiffre troué nous donne le degré de salure en se référant à une échelle d'interprétation **(Voir détails au Tp3).**

3-1-2-3-Interprétation du résultat trouvé

Il existe plusieurs échelles d'interprétation de la CE de l'extrait 1/5 mais dans notre cas on suit l'échelle européenne **(d'après Aubert, 1978)** comme suit :

mmhos/cm= mS/cm	0.6	1.2	2.4	6
meq/100g	3	6	12	30
Non salé	peu salé	salé	très salé	extrêmement salé

Figure 3 : Echelle d'interprétation de la CE du sol

3-1-2-4-Importance agronomique de détermination de la salinité du sol

L'accumulation des sels solubles dans le milieu poreux et la modification du complexe adsorbant (phénomène d'échange) conduisent à une transformation profonde des propriétés physiques et chimiques du sol avec pour conséquence la réduction de la capacité de croissance des cultures et une diminution des rendements.

*Le premier objectif de l'irrigation consiste à apporter aux plantes, au moment opportun, les quantités d'eau nécessaires, afin d'éviter les baisses de rendement provoquées par de longues périodes de déficit hydrique. Cependant après des irrigations répétées (surtout avec des eaux salines et parfois même avec des concentrations minimes des sels), les sels contenus dans l'eau d'irrigation peuvent s'accumuler dans le sol et réduire les disponibilités en eau de la plante. La plante extrait l'eau du sol en exerçant une force d'adsorption supérieure à celle qui retient l'eau dans le sol lorsque ce dernier est salé.

La présence de sel dans le sol augmente la force que doit fournir la plante pour extraire l'eau. C'est l'effet osmotique. Cette présence de sel se traduit par une réduction de la disponibilité de l'eau d'autant plus

importante que le sol soit sec et que la salinité est assez forte. Ainsi, les effets de la salinité sont très semblables à ceux de la sécheresse car toutes les deux génèrent un déficit hydrique et une réduction de croissance.

*Certains sels peuvent être toxiques pour la plante ou peuvent affecter la balance nutritionnelle s'ils sont présents en quantité excessive ou en proportions anormales. Selon Ayer et Westcot, le chlore devient toxique pour les cultures sensibles au delà d'une valeur de 4meq/l dans l'eau d'irrigation.

A faible concentration dans la solution du sol, le bore a un effet très nocif sur les plantes.

3-2-Les phénomènes d'échanges des ions dans le sol (en particulier la CEC)

Le sol ne présente pas la capacité d'absorber des éléments, il a la particularité **d'adsorber** (fixer à la surface pas à l'intérieur) ces élément et de les échanger avec les solution environnantes.

L'adsorption est la rétention de substances sans combinaison à la surface des constituants solides. La désorption est le phénomène inverse.

L'adsorption des ions s'explique par l'existence de charges électriques contraires qui s'attirent.

Le CAH (complexe argilo-humique) chargé négativement à sa surface, a la capacité de retenir (à sa surface) des cations provenant de la solution du sol; c'est le pouvoir adsorbant. Un équilibre s'établit entre les ions adsorbés et les ions libres dans la SS.

Ces cations sont **momentanément** fixés, ils peuvent être échangés par le phénomène de désorption.

A chaque instant, se désorbent autant d'ions qu'ils ne s'en adsorbent.

La notion d'échange ionique dans le sol met en jeu: un échangeur qui est le complexe adsorbant et une solution saline qui est la solution du sol.

Pour la capacité d'échange ionique (CEI) on distingue: la CEA et la CEC

3-2-1-La capacité d'échange anionique

Le sol n'est pas un échangeur exclusif des cations, on doit prendre en considération la présence des charges positives (sur les matières organiques et les charges de bordures sur les argiles), qui en présence d'une solution ne peut être équilibré que par l'adsorption d'anions

3-2-2-La capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique (CEC) d'un sol est exprimée en meq/100g.

C'est la quantité totale de cations (ions+) que le sol peut adsorber sur son complexe d'échange ets'échanger avec la solution environnante dans des conditions de pH bien définies.

Pour un sol, la capacité d'échange cationique est due aux substances colloïdales (au sens large du terme) portant des charges négatives tels que les minéraux argileux, la matière organique et le silice colloïdale.

3-2-2-1-Les origines de la CEC

Les sources de charges responsables de la capacité d'échange d'un sol, peuvent être divisées principalement en deux catégories : inorganique (minérale) et organique

***Origine inorganique**

Il s'agit de celle issue des sables, limons et argiles

-La capacité d'échange des fractions limoneuses et sableuses

La CEC des sables est due aux faits que les cations sont retenus dans les crevasses de la surface des sables et par la couche d'eau (film d'eau) retenue à la surface des sables

La CEC des limons quant à elle, est plutôt due aux agrégats.

Ces agrégats sont de deux types: les vrais agrégats et les pseudo-agrégats

-La capacité d'échange des argiles est due à :

Les liaisons de bordures, les substitutions internes iso-morphiques, les liaisons de VENDERWEALS, dissociation des hydroxyles

*** Origine organique**

La capacité d'échange cationique de la matière organique est due aux dissociations des groupes carboxyles et hydroxyles (COOH et OH)

3-2-2-2-Importance du phénomène d'échange

Dans le sol, le complexe adsorbant joue le rôle essentiel qui consiste à stocker les cations indispensables à la nutrition végétale.

Si le sol ne possède pas cette capacité de stocker et d'échanger des cations, les pluies et les irrigations entraîneraient les minéraux vers les couches les plus profondes non explorables par les végétaux et approvisionneraient le sol totalement

3-3-Transformations d'origine microbienne (en donnant un exemple du cycle de l'un des éléments majeurs dans le sol)

On a choisis de présenter le cycle de l'un des éléments les plus importants et indispensables à la vie et au développement des plantes ; **l'N.**

Le cycle de l'azote est très complexe; le schéma suivant en présente une simplification.

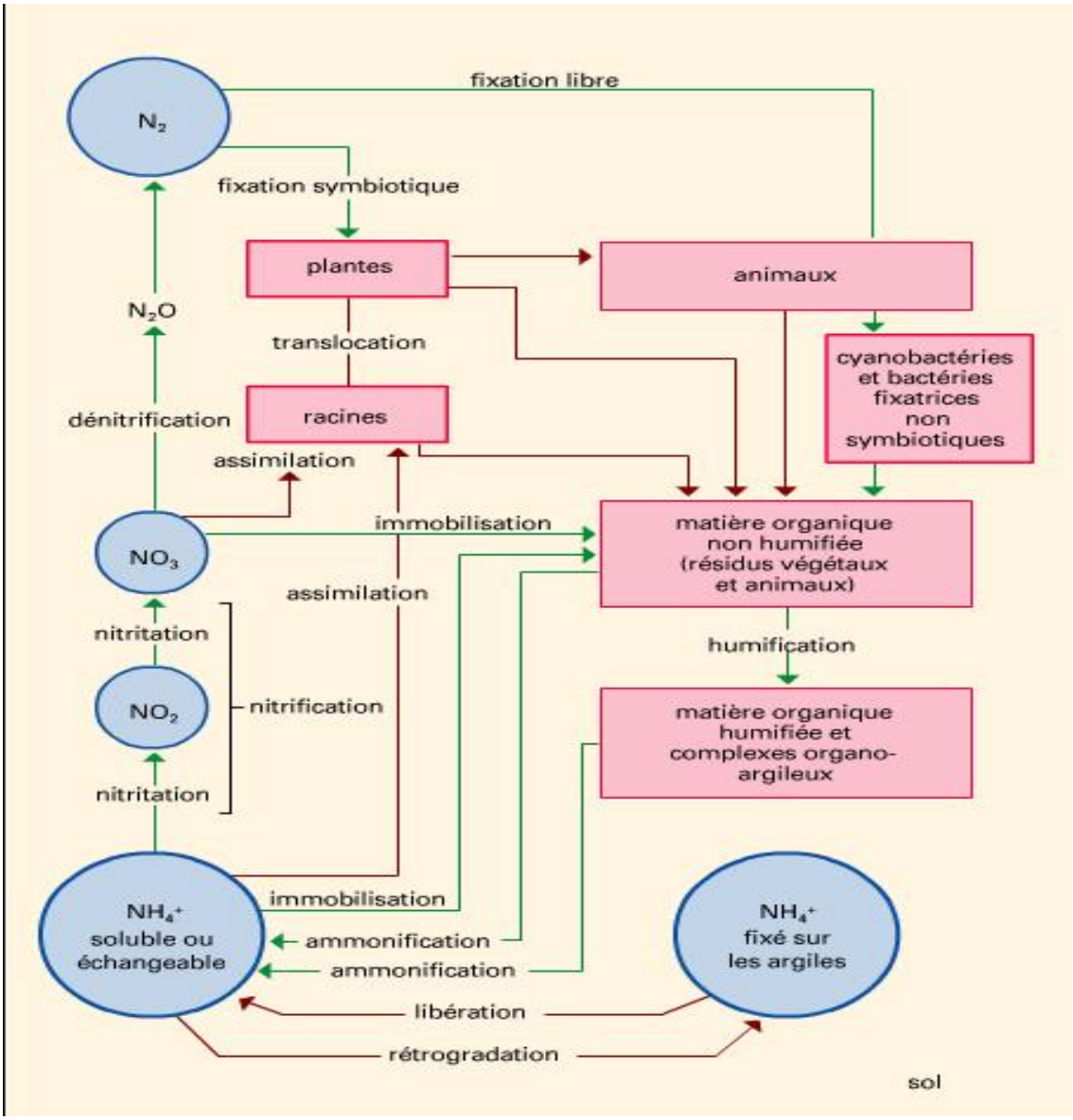

Figure 4. Le cycle de l'azote

Trois processus de base sont impliqués dans le recyclage de l'azote: la fixation de l'azote diatomique N_2, la nitrification et la dénitrification.

****La fixation de l'azote :**

Correspond à la conversion de l'azote atmosphérique en azote utilisable par les plantes et les animaux. Elle se fait par certaines bactéries qui vivent dans les sols qui réussissent à assimiler l'azote diatomique N_2.

Il s'agit en particulier des ***cyanobactéries*** et de certaines ***bactéries vivant en symbiose*** avec des plantes (ex : les légumineuses). La réaction chimique type est:

$$2N_{2(g)} + 3\{CH_2O\} + 3H_2O \longrightarrow 4NH_4^+ + 3CO_2 \quad (1)$$

azote (gaz) — matière organique — eau — ammonium — dioxyde de carbone

****La nitrification**

Transforme les produits de la fixation atmosphérique (NH_4^+) soient en nitrites (NO_2^-) e tnitrates (NO_3^-).

C'est une réaction d'oxydation qui se fait par catalyse enzymique reliée à des bactéries dans les sols. La réaction en chaîne est de type:

$$NH_4^+ \rightleftharpoons NO_2^- \rightleftharpoons NO_3^-$$

ammonium — nitrite — nitrate

Soit:

$$2NH_4^+ + 3O_2 \longrightarrow 2NO_2^- + 2H_2O + 4H^+$$

ammonium — oxygène — nitrite — eau — hydrogène

$$2NO_2^- + O_2 \longrightarrow 2NO_3^-$$

nitrite — oxygène — nitrate

****La dénitrification**

Retourne l'azote à l'atmosphère sous sa forme moléculaire N_2, avec comme produit secondaire du CO_2 et de l'oxyde d'azote N_2O, un gaz à effet de serre qui contribue à détruire la couche d'ozone dans la stratosphère. Il s'agit d'une réaction de réduction de NO_3^- par l'intermédiaire de bactéries transformant la matière organique. La réaction est de type :

$$4NO_3^- + 5\{CH_2O\} + 4H^+ \longrightarrow 2N_{2(g)} + 5CO_{2(g)} + 7H_2O$$

nitrate — matière organique — hydrogène — azote (gaz) — dioxyde de carbone — eau

3-3-La fertilité des sols, les élément majeurs et oligo-éléments, symptômes de carence de ces éléments dans le sol…

3-3-1- Définitions

Plusieurs définitions ont étaient donnée à la fertilité d'un sol qu'on cite :

*La fertilité est la facilité avec laquelle la racine peut bénéficier dans le sol des différents facteurs de croissance: chaleur, eau, éléments chimiques nécessaires à la plante.

*De point de vue pédologique, la fertilité d'un sol est en relation étroite avec ces propriétés physiques chimiques et biologiques. C'est ainsi qu'on parle dans un sol d'une fertilité physique, chimique, biologique et d'une nouvelle notion; fertilité hydrique.

Les facteurs qui influencent la fertilité d'un sol donc :

Des facteurs physiques: la composition minéralogique, la texture, la structure, stabilité structurale, la densité apparente, la capacité de rétention en eau et la porosité……Des facteurs chimiques: le pH, la CEC, la conductivité électrique de la solution du sol, la teneur en carbone organique, la teneur en éléments nutritifs assimilables ou totaux (N, P, K, Ca, Mg, Na, S, B, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn,…). Des facteurs biologiques: la biomasse microbienne, les activités enzymatiques, l'abondance de la faune du sol….

* Pour améliorer ces facteurs, on utilise le travail du sol, les amendements organiques et minéraux ou bien la fertilisation.

3-3-2-Les éléments majeur et les oligo-éléments

Pour se développer, les plantes prélèvent dans le milieu qui les entoure (air, eau, sol) les éléments nécessaires à leur vie et à leur développement. C'est ainsi qu'on distingue :

***Les 3 éléments C, H, O (**qui représentent 98 % de la biomasse d'une plante).

***Les éléments majeurs (qu'on apelle aussi nutriments de base) :**

Il s'agit des éléments:**N, P, K, Ca, Mg, S**; absorbés souvent en quantité élevée par les plantes avec des teneurs supérieures au g/kg MS (matiére sèche) d'une plante (il y a une grande variabilité dans les teneurs de ces éléments dans les tissus végétatifs selon les espèces, variétés et des conditions du milieu), et on peut les subdivisés en deux groupes :

****Les éléments majeurs primaires :** azote, phosphore, potassium.

****Les éléments majeurs secondaires :** calcium, magnésium, soufre.

La différence entre les deux réside dans le fait suivant : les éléments majeurs primaires, sont utilisés à des quantités très importantes par rapport aux éléments majeurs secondaires.

***Les oligo-éléments :** comme le bore, le fer, le cuivre, le manganèse, le molybdène et le zinc. Présentent des teneurs de l'ordre du mg ou du dixième de mg/kg de MS des plantes. Ils sont indispensables à faible dose et lorsqu'ils dépassent le seuil optimum, ils devenant toxiques.

Parmi les éléments majeurs on a choisi l'azote N et des oligoéléments le fer pour présenter les effets et les symptômes de carences.

*** L'azote :** l'azote est l'élément nutritif le plus déficient dans les systèmes de production agricole. La plupart des systèmes de cultures non légumineuses exigent l'apport d'azote, particulièrement les variétés à haut rendement.

****Les rôles de l'azote chez la plante**

- Elément constituant des protéines.
- Favorise la multiplication des chloroplastes.
- Favorise la synthèse des glucides.
- Constituant essentiel du cytoplasme et de ses éléments constitutifs ; chloroplastes, mitochondries, ADN du noyau, membranes…...
- Elle est nécessaire à tous les stades de la plante

****Les symptômes de carence chez la plante**

- Le jaunissement (chlorose) sur les feuilles.
- Une taille réduite des feuilles.
- Une hauteur réduite des plantes

****Les conséquences d'excès d'azote chez la plante**

- Un retard de maturité
- Une sensibilité plus grande des tissus aux maladies et au gel
- Une sensibilité des céréales a la verse

***Le fer**

****Rôle du fer chez la plante: il** intervient dans la photosynthèse, la respiration, la réduction des nitrates…, nécessaire à la synthèse de la chlorophylle**, i**l entre dans la composition de certains enzymes.

****Symptômes de carence en fer : c**hlorose (décoloration) des jeunes feuilles. En cas de carence aiguë les feuilles deviennent presque blanches et dépérissent. On rencontre des carences en Fe en arboriculture fruitière, dans la culture des petits fruits et en viticulture.

****Remède : p**ulvérisation foliaire immédiate de sulfate, de citrate ou de chélate de Fe, apport de chélates de fer au sol, action sur le pH du sol vers la neutralité ou une faible acidité et amélioration de la teneur du sol en matière organique

Remarque:

Pour apprécier une situation de **déficience**, la **sensibilité des cultures** doit être croisée avec les **conditions de sols** (propriétés physiques, chimiques, biologiques et hydriques **déterminées par analyse régulière** du

sol), de **végétation** (besoins de la plante ou ce qu'on appelle exigences culturales) des **conditions climatiques** et **l'historique de la fertilisation** du sol à utiliser.

Tableau 3: Quelques exemples des cultures sensibles et très sensibles au Fer, Mn, Zn, Cu, Bo et Mo

	Cultures très sensibles	**Culture sensibles**
Fer	Arbres fruitiers, vigne, pois, soja	Maïs, sorgho, lupin, haricots
Manganèse	Blé, orge, avoine, sorgho, betterave, pois, soja	Maïs, pomme de terre, luzerne, colza, tournesol, trèfle, arbres fruitiers
Zinc	Maïs, lin, haricot	Sorgho, pomme de terre, soja, arbres fruitiers
Cuivre	Blé, orge, avoine	Maïs, sorgho, pois, luzerne, arbres fruitiers
Bore	Betterave, luzerne, tournesol	Colza, pois, pomme de terre, lin, trèfle, arbres fruitiers, vigne
Molybdène	Luzerne, pois, melon, trèfle	Colza, soja

Figure 5 : Quelques signes (symptômes) de carences des éléments nutritifs sur la plante

Carence en azote sur blé tendre

Carence en soufre sur blé tendre

Carence en Magnésium sur feuille de tomate

Carence en Magnésium sur vigne

Figure 6 : Autres signes (symptômes) de carences des éléments nutritifs les plantes