

Les éléments minéraux.

B. Lerot

Résumé

Les éléments minéraux sont importants pour la croissance et le développement des plantes. Dans ce document, est expliqué leur sources (minérale, organique ou autre) ainsi que les rôles, les symptômes de carence et excès de chaque élément.

Sommaire.

Sommaire.....	1
Introduction.....	2
1. Les éléments majeurs ou macro-éléments.....	3
1.1. L'azote (N).....	3
1.2. Le phosphore (P).....	6
1.3. Le Potassium (K).....	8
2. Les éléments secondaires ou méso-éléments.....	11
2.1. Le Calcium (Ca).....	11
2.2. Le magnésium (Mg).....	13
2.3. Le soufre (S).....	14
3. Les oligo-éléments.....	16
3.1. Le fer (Fe).....	16
3.2. Le manganèse (Mn).....	17
3.3. Le cuivre (Cu).....	19
3.4. Le zinc (Zn).....	20
3.5. Le bore (B).....	22
3.6. Le molybdène (Mo).....	23
4. Les autres éléments utiles.....	25
4.1. L'aluminium (Al).....	25
4.2. L'arsenic (As).....	25
4.3. Le cadmium (Cd).....	25
4.4. Le césium (Cs) et le rubidium (Rb).....	25
4.5. Le chlore (Cl).....	25
4.6. Le cobalt (Co).....	25
4.7. Le Fluor (F).....	25
4.8. L'iode (I).....	26
4.9. Le sélénium (Se).....	26
4.10. Le silicium (Si).....	26
4.11. Le sodium (Na).....	26
4.12. Le titane (Ti).....	26
4.13. Le vanadium (V).....	27
5. Déterminer une carence ou un excès de manière pratique.....	28

Introduction.

Les éléments minéraux sont indispensables à une bonne croissance et un bon développement des plantes, végétatif ou génératif mais également pour la résistance aux maladies et ravageurs.

Cet article a pour but de présenter l'importance des éléments utiles pour les plantes. Pour ce faire, vous trouverez les différentes sources de chaque élément utile, leur disponibilité et la (les) forme(s) assimilée(s) par la plante, leurs rôles mais également les problèmes physiologiques générés par une carence (ou manque) et les excès en ces éléments.

Les éléments indispensables aux plantes sont : l'azote, le phosphore, le potassium, le calcium, le magnésium, le soufre, le manganèse, le molybdène, le cuivre, le zinc, le fer et le bore. À ceux-là viennent s'ajouter quelques autres éléments présentant une importance différente selon l'élément et les plantes concernées.

Aux niveaux des carences et des excès, les différents symptômes évoqués ne seront pas forcément tous présents au même moment. En effet, selon le degré atteint par la carence ou l'excès, certains symptômes s'exprimeront et d'autres non. De plus, chaque genre voir même chaque espèce manifeste la carence ou l'excès d'un élément de manière très différente.

Malgré cela, ce document peut s'appliquer pour n'importe quelle culture, que ce soit de la culture sur sol, que les cultures dite « hors sol » (en pot, en conteneur, panier, écorce, laine de roche, etc.).

Pour les plantes cultivées « hors sol », il faudra bien évidemment garder un œil critique au niveau des sources des éléments qui ne seront pas forcément toutes présentes et pour lesquels les carences et excès peuvent se manifester plus ou moins rapidement selon les substrats employés.

1. Les éléments majeurs ou macro-éléments

Dans le monde végétal, on distingue 9 éléments principaux indispensables à la plante. Ces éléments sont le Carbone (C), l'Hydrogène (H), l'Oxygène (O), l'Azote (N), le Phosphore (P), le Potassium (K) mais également le Calcium (Ca), le Magnésium (Mg) et le Soufre (S) qui sont souvent classés comme éléments secondaires bien qu'ils soient aussi importants que les macro-éléments.

Les trois premiers (C, H, O) sont apportés directement par le dioxyde de carbone et l'eau, on ne doit dès lors pas se préoccuper de leur apport excepté dans les serres où on peut augmenter la concentration en CO₂ jusqu'à 3%.

La composition minérale de la matière sèche des plantes comporte de 40 à 50% de carbone, 42 à 45% d'oxygène et de 6 à 7% d'hydrogène.

1.1. L'azote (N).

L'azote représente entre 1 à 3% de la matière sèche (M.S.) des plantes et jusqu'à 4-6% dans les plantes en pleine croissance.

L'azote est le principal élément plastique servant à fabriquer les matériaux de construction des tissus végétaux. Il est indispensable à la plante à tous les stades de végétation (jeunesse, croissance, reproduction, mise en réserve.)

1.1.1. Les différentes sources d'azote.

Contrairement à d'autres éléments, l'N ne provient en aucun cas de la dégradation chimique et physique des roches (qui n'en contiennent que très peu 1% des réserves du sol) mais bien de deux sources distinctes : l'atmosphère (dont il occupe les 4/5) et les sources organiques (99% des réserves du sol). À cela, on doit rajouter depuis l'apparition de l'industrie chimique, l'azote sous forme d'engrais chimiques.

La source atmosphérique : l'azote est présent sous sa forme moléculaire stable N₂. Cette forme de l'azote est inutilisable directement par les plantes. Avec les orages, il se forme de l'acide nitrique (H₂NO₃) qui est entraîné au sol par les précipitations.

Les bactéries fixatrices d'azotes, libres ou associées aux racines de certaines plantes (principalement les Fabaceae), sont capables d'utiliser l'azote atmosphérique.

La source organique : formation d'azote sous forme d'ammoniaque et de nitrate grâce à la microflore du sol (Azotobacter, Nitrobacter, Nitrosomonas...) à partir des matières organiques animales et végétales. L'azote rejeté sous forme anionique est de l'ordre de 120 à 130kg/ha/an dans les sols de bonne qualité contre la moitié dans les sols mauvais. La teneur du sol en azote organique est de 0.02 à 0.4% et diminue avec l'augmentation de température (favorisant la minéralisation de l'humus) et la lixiviation.

De par l'intensité de la minéralisation microbienne et sa mobilité très élevée dans les sols, ces derniers vont contenir plus ou moins d'azote.

Quelques exemples : un sol de prairie contient plus d'azote qu'un sol forestier ;

Un versant nord en contient plus que le versant sud tout comme le bas d'une pente par rapport au sommet (érosion)

L'humus doux est plus riche que l'humus brut.

La stabilité de l'azote organique dans un sol consiste dans le fait que 99% reste à l'état organique

Par des combinaisons stables soit dans les formes cycliques dans les acides humiques soit entre la lignine et les groupements fonctionnels des acides aminés ($-NH_2$).

Par des combinaisons entre l'N organique et l'argile qui retiennent plus ou moins l'azote selon les types d'argiles. La bentonite retenant mieux l'N que la kaolinite.

Par une néo-protéinisation issues des micro-organismes ou la fixation par les racines des végétaux.

La minéralisation est la transformation de l'N organique en nitrates par les micro-organismes du sol. On peut inhiber la minéralisation en jouant sur le rapport C/N : un large apport de glucides va consommer les nitrates pour la néo-protéinisation. À l'inverse, un rapport C/N faible favorise la production de nitrates.

Plus les glucides apportés seront résistants (lignine) plus la minéralisation est retardée, car ces matières sont faiblement dégradées et aboutit à de l'humus stable et durable.

Cette minéralisation dépend de différents facteurs :

Le rapport C/N : cf plus haut.

Le pH du sol : l'augmentation du pH augmente l'intensité de la minéralisation à condition qu'il soit le seul facteur limitant.

L'hydrométrie: le substrat doit être suffisamment pourvu en eau pour que les micro-organismes puissent se développer. Un sol trop sec ou trop humide diminue voire arrête la nitrification. À noter l'influence de la température ; plus celle-ci est élevée plus le sol peut être humide. De plus, l'eau entraîne les anions azotés par lixiviation pouvant le rendre indisponible aux plantes.

L'aération du sol : plus la teneur en oxygène est élevée, plus la nitrification se déroule.

La température : tout comme la teneur en oxygène, plus la température est élevée plus, la minéralisation est favorisée.

La plante : autour du système racinaire pullule une microflore fixatrice de l'azote minéralisé.

La saison qui influe sur les facteurs précités.

La source synthétique : formée également à partir de l'azote atmosphérique mais demandant une dépense énergétique fossile pour la formation des engrais nitriques, ammoniacaux et autres.

1.1.2. L'administration d'azote et son assimilation.

L'azote nitrique: la forme la plus soluble et principalement utilisée par les plantes. L'inconvénient majeur de l'azote nitrique (NO_3^-) est qu'il n'est pas absorbé par les composants du sol et des substrats, il est donc très vite évacué par les arrosages et pluies.

L'azote ammoniacal : forme transitoire mais retenue par les charges négatives des substrats. Son assimilation par les plantes est possible sous cette forme mais en très faible quantité. L'ammoniac (NH_4^+) va être oxydée par les bactéries nitrifiantes en NO_3^- . On aura donc un effet retard par rapport à l'azote nitrique si l'on administre l'azote sous cette forme.

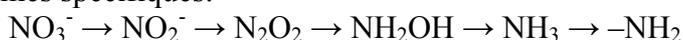
L'azote organique : réserve azotée du sol (l'humus titre à $\pm 5\%$ d'N) et des substrats. L'azote sous cette forme n'est pas directement utilisable. L'azote organique subira une

minéralisation qui produira dans un premier temps de l'azote ammoniacal et ensuite de l'azote nitrique ; l'effet retard sera d'autant plus important que le sol (ou substrat) est pauvre en micro-organisme.

Le pH, va stimuler le prélèvement soit des nitrates soit de l'ammoniaque. À pH faible, c'est les nitrates qui sont absorbés avec comme conséquence la remontée du pH. Par contre à pH élevé, ce sont les ions NH_4^+ qui sont favorisés avec comme conséquence un abaissement du pH.

L'espèce végétale va influencer sur le prélèvement (espèces nitricoles ou ammoniacoles). Les plantes jeunes vont préférentiellement absorber de l'ammoniac (NH_3) pour se tourner vers les nitrates en vieillissant.

Au niveau de la plante, les nitrates assimilés vont être réduits en $-\text{NH}_2$ sous l'action d'enzymes spécifiques:



Cette série de réaction est dépendante des ondes courtes de la lumière (bleu) ; les H^+ nécessaires proviennent probablement de la dégradation des glucides qui fournit également l'énergie nécessaire aux réactions.

1.1.3. Les rôles physiologiques et agronomiques de l'azote.

- Il est l'un des constituant de l'ADN ;
- Il entre dans la composition des protéines cytoplasmiques, membranaires et des chloroplastes ;
- Il est également un constituant des enzymes.
- Il est conservé sous forme de matières de réserves protéiques, principalement dans les graines.

L'apport d'azote va donc permettre à la plante :

- La multiplication cellulaire et donc la croissance végétative grâce à la formation d'une auxine (l'acide indole acétique) qui favorise la prolifération des bourgeons et ralentit la formation des pointes de racines. L'azote est défavorable à la floraison et à la fructification.
- La multiplication des chloroplastes responsables de la photosynthèse.
- La synthèse de glucides via les chloroplastes transformés par la suite en acides aminés et en protéines.
- Le fonctionnement de la plante grâce à la production de protéines, enzymes et autres cursus responsable des réactions biochimiques de la plante.
- La constitution des matières de réserves azotées.

1.1.4. Les carences azotées.



Source : 6.

Les principaux signes de carences en azote :

- Une Chlorose apparaît tout d'abord sur les plus anciennes feuilles et très vite sur les plus jeunes. Les feuilles deviennent vert-jaunâtre suivit d'une couleur orangée qui s'ajoute à la chlorose. Finalement on observe la chute des feuilles.

- Les feuilles se dressent et deviennent plus raides ; les nervures deviennent plus prononcées.
- Plante chétive
- Retard de croissance.
- Organes de réserves peu développés.
- Diminution de la surface foliaire

Les causes de la carence :

- Apports insuffisants ou sol trop drainant.
- Sol acidifié.

1.1.5. Les excès d'azote.

- Prolifération de la partie végétation au détriment de la floraison.
- Retard de maturation ; les organes de réserves sont de moins bonnes qualités.
- Les feuilles sont vert-foncé.
- Les parties ligneuses sont moins nombreuses.
- Racines courtes, épaisses et moins nombreuses. Les racines fixent moins bien la plante dans le sol.
- Fructification peu importante.
- Plantes plus sensibles aux maladies et ravageurs.

1.2. Le phosphore (P).

Présent entre 0.2 à 1.5% de la matière sèche exprimé en P_2O_5 , il est également considéré comme un élément plastique.

1.2.1. Les différentes sources de phosphore.

Le phosphore assimilable dans la solution du substrat est :

- Sous forme d'anion. Les anions $H_2PO_4^-$ et HPO_4^{2-} sont ceux prélevés par les plantes dans la gamme de pH compatible à leur croissance. Le premier domine en sol acide (entre pH 3 à 6), le deuxième en sol neutre à basique (pH 7 à 10). En sol fortement acide (pH < 3) et en sol alcalin (pH > 13) ce sont respectivement les formes H_3PO_4 et PO_4^{3-} qui prédominent mais ces deux gammes de pH sont peu rencontrées dans les sols.
- Lié aux matières organiques et en constitue la réserve organique.
- Lié au complexe adsorbant et constituant la réserve minérale.

Le phosphore facilement assimilable, lié à des adsorbants par diverses liaisons chimiques :

- la complexation (ou chimisorption) est la liaison principale. On a la liaison en sol acide des orthophosphates avec des ions ferriques ou aluminiques et, en sol basique avec les ions calciques.
- Les ponts calciques : les ions Ca^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} se fixent aux argiles, à l'humus d'un côté et au phosphore de l'autre empêchant sa disparition.

Le phosphore difficilement échangeable est insolubilisé dans les sols calcaires ou acides, c'est l'effet de rétrogradation des phosphates.

- en sol acide, les ions phosphates se lient à l'aluminium et au fer sous forme de $FePO_4$ et $AlPO_4$. Tant que le pH est trop bas, les phosphates resteront non utilisables

- en sol basique, il se forme tout d'abord du CaHPO_4 et ensuite du $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. Dans ce cas, l'action microbologique et les matières organiques pourront remettre les anions phosphates en solution.

Le phosphore organique se présente sous deux formes :

- Présent dans la matière organique typique tels que les nucléoprotéines, phospholipides, phytine...
- L'humus, représente 90% de la fraction organique phosphatée.

Les matières organiques vont permettre l'assimilation phosphatée par la minéralisation et par l'action sur le phosphore minéral. Les matières organiques vont également protéger le phosphore de l'insolubilisation en multipliant les sites d'adsorption.

1.2.2. L'administration de phosphore et son assimilation.

Les engrais phosphatés sont classés selon leur solubilité soit dans l'eau soit dans différents solvants. On a les engrais solubles, hyposolubles et insolubles.

Les engrais solubles sont les engrais contenant du phosphore sous forme de H_2PO_4^- ; les hyposolubles contiennent du HPO_4^{2-} ; les insolubles du PO_4^{3-}

Le phosphore est assimilé par les plantes sous la forme d'orthophosphate (H_2PO_4^-) et de pyrophosphate (HPO_4^{2-}). Contrairement à l'azote, celui-ci n'est pas transformé dans la plante ; soit il reste sous cette forme inorganique, soit il se lie à des substrats par phosphorylation ou encore il se lie à un autre phosphate pour donner une liaison riche en énergie (notamment l'ATP)

Les tissus jeunes sont relativement riches en phosphore et lors de la floraison, celui-ci est redistribué vers les inflorescences.

Le pH du substrat va avoir une action directe sur la solubilité du phosphore et, par conséquent, son assimilabilité par la plante.

1.2.3. Les rôles physiologiques et agronomiques du phosphore.

- Fonction plastique :
 - o c'est un constituant des acides nucléiques entrant dans la jonction entre les nucléotides.
 - o Constituant des phospholipides des membranes végétales.
- Fonction énergétique : L'ATP (adénosine tri-phosphate) est la source principale d'énergie du métabolisme, l'hydrolyse de l'ATP produisant un phosphate inorganique (qui se lie au substrat à phosphoryler) et libérant l'énergie nécessaire à cette phosphorylation.
- Des fonctions métaboliques : - la phosphorylation des glucides ainsi que d'autres substrats organiques les rendent plus réactifs aux réactions biochimiques du métabolisme.
 - catalyseur de la synthèse des glucides à partir de CO_2 et de H_2O .

Le phosphore est dans la plante:

- Un activateur de la croissance des bourgeons et des racines.
- Participe au transfert d'énergie dans la plante.
- Un activateur de la synthèse des glucides et leur mise en réserve.

- Un facteur de précocité de la mise à fleur et de la fructification.
- Un facteur de résistance au froid et aux ravageurs par suite d'une plus forte teneur en glucides.

Le phosphore est mis en réserve dans les graines sous forme de phytine ou acide phytique.

1.2.4. Les carences phosphoriques.

L'apport insuffisant en phosphore induit :

- stade bénin :
 - o Un ralentissement de la croissance, la plante est plus élancée, les feuilles minces, dressées. Les nervures sont peu prononcées
 - o Un feuillage vert foncé tirant sur le bleu avec un jaunissement et un dessèchement de l'extrémité des feuilles. Une coloration pourpre se marque à l'extrémité des feuilles ainsi qu'une ondulation.
- Stade aigu
 - o Les feuilles jaunissent, se nécrosent et finissent par tomber.
 - o Une mauvaise fécondation.
 - o Un retard de maturité.



1.2.5. Les excès phosphoriques.

La capacité du phosphore à être complexé sous des formes hyposolubles et insolubles permet aux substrats d'avoir d'une part une bonne réserve phosphatée et d'autre part, cela permet d'éviter les excès phosphoriques.

1.3. Le Potassium (K).

Il est présent à raison de 2 à 4% de la matière sèche et est exprimé sous forme de K_2O dans les engrais.

Le potassium est présent en forte concentration dans les tissus jeunes en pleine croissance et en moindre quantité dans les organes âgés.

Le potassium n'est pas un élément plastique mais un élément à fonction électrochimique et catalytique.

1.3.1. Les différentes sources de Potassium.

Le K lié aux minéraux silicatés (mica, feldspath) ainsi qu'aux argiles, vont être libérés progressivement par l'altération des minéraux.

Le K échangeable et facilement utilisable dans la solution du sol ou adsorbé au complexe adsorbant.

Le K fixé qui constitue une réserve lentement utilisable. Les ions K^+ peuvent passer des couches externes aux couches internes des argiles. Selon le type d'argile, la rétrogradation du K le rend différemment échangeable ; ce phénomène étant accentué par l'alcalinisation du sol.

Il y a un équilibre entre ces trois formes et le K dans la plante.

Argile K (non échangeable) ↔ K (échangeable) ↔ K (engrais) ↔ K (plante)

Le K contenu dans les matières organiques le rend facilement utilisable soit, directement à la mort des végétaux par l'évacuation des ions du suc cellulaire, soit, après la mort et la décomposition des végétaux.

1.3.2. L'administration du potassium et son assimilation.

Le K est souvent administré sous forme de sulfate (K_2SO_4), de chlorure (KCl), de nitrate (KNO_3) ou encore de carbonate (K_2CO_3).

Le K est absorbé sous forme d'ions K^+ et reste sous cette forme dans la plante. Cet ion est très mobile dans toute la plante.

Le pH du sol agit sur l'assimilabilité du K ; un pH alcalin le favorisant.

De même, un sol ayant une bonne structure et donc bien aéré augmente la quantité de K assimilable.

1.3.3. Les rôles physiologiques et agronomiques du potassium.

Le K dissous dans les liquides cellulaires va jouer un rôle important dans :

- La maintenance et la régulation de la pression osmotique.
- L'équilibre acide-base dans la cellule évitant son acidification. En fait, il remplace les ions H^+ des composés (NO_3^- , acides organiques) pendant leur transport dans la plante.
- Il a une action directe sur l'ouverture et la fermeture des stomates participant ainsi à la diminution des risques de flétrissement.
- Constituant de certains enzymes entrant dans la catalyse de la synthèse des protéines, de l'ATP et dans la photosynthèse. Il stimule également les enzymes de la phosphorylation et inhibe celles de la respiration.
- Il facilite le transport des glucides dans la plante, leur transformation en lipides et leur mise en réserve.
- Augmente la résistance au froid et aux cryptogames.
- Favorise le développement du système racinaire et la flexibilité des tissus.
- Il favorise l'assimilation du CO_2 par la plante.

1.3.4. Les carences potassiques.



Source : 6.

Les carences en K se manifeste, de par sa grande mobilité dans la plante, dans un premier temps sur les feuilles âgées.

Les symptômes de carence.

- Retard de croissance surtout dans la fructification.
- Diminution de la résistance à la sécheresse par perte de la turgescence et aux maladies cryptogamiques..
- Coloration bronze du feuillage suivit de nécroses. Une ondulation du bord foliaire peut apparaître selon l'intensité du manque.
- Une tendance au flétrissement.

À noter qu'une carence en K associée à un excès en azote prolonge la période de végétation associée à une maturation retardée des graines.

1.3.5. Les excès potassiques.

Les plantes sont très friandes du K et en font une consommation de luxe.

Mis à part le fait d'augmenter la sensibilité aux parasites et maladies, et notamment les maladies à virus, l'excès de K bloque l'assimilation du Mg et du Ca faisant apparaître des signes de carences magnésiennes et calciques même si ces éléments sont présents en quantité suffisante.

2. Les éléments secondaires ou méso-éléments

2.1. Le Calcium (Ca).

Représentant entre 1 à 2% dans la matière sèche et exprimé sous forme de CaO, le calcium est un élément essentiel à la bonne croissance de la plante.

2.1.1. Les différentes sources de calcium.

Le calcaire inactif, sous forme de grosses particules de carbonate de calcium (CaCO_3), est peu soluble. Cette forme est issue des roches sédimentaires, métamorphiques ou de minéraux silicatés. Malgré sa maigre solubilité, le carbonate de calcium est facilement transformé en bicarbonate ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) très soluble. On le trouve aussi sous forme de phosphates, sulfates d'humates de Ca et d'alumin-silicates.

Le calcaire actif est également sous la forme de carbonates mais à l'état de fines particules ce qui le rend beaucoup plus dégradables par les acides humiques, minéraux (principalement le HCO_3^-) et les acides excrétés par les plantes.

Le calcium soluble, source principale des ions Ca^{2+} , provient des fertilisants dont la solubilité diffère selon les composés (sulfates, carbonates, hydroxydes...).

Le calcium échangeable est le calcium adsorbé sur le complexe adsorbant des substrats qui se trouve en équilibre avec la solution du sol.

2.1.2. L'administration du calcium et son assimilation.

L'apport de calcaire s'effectue par des amendements calcaïques souvent associés à du magnésium

Les différents amendements sont :

- Le calcaire (CaCO_3),
- La dolomie ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$),
- La craie ($\text{CaCO}_3 + \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)
- Les marnes ($\text{CaCO}_3 + \text{argiles}$)
- Le gypse (CaSO_4)
- Les Maërls (algues fossile calcifères)
- Chaux agricole ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)
- Chaux magnésienne éteinte ($\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Mg}(\text{OH})_2$)

La forme du Ca dans la plante est principalement le CaSO_4 sous forme soluble et les formes insolubles (oxalates, pectinate, phosphate et carbonate de Ca).

Les plantes riches sont les Equisetaceae, les plantes grasses, les Fabaceae et les Brassicaceae.

2.1.3. Les rôles physiologiques et agronomiques du calcium.

- Augmentation de la transpiration et diminution de l'absorption de l'eau par les racines.
- Composant de la membrane et des parois, auxquelles il donne de la résistance.
- Diminution de la perméabilité de la membrane vis-à-vis de l'absorption du K, du Fe et des métaux lourds toxiques.
- Tout comme le K, le Ca va neutraliser les acides organiques de la vacuole cellulaire avec formation de cristaux tels que l'oxalate, le citrate ou le tartrate de Ca.
- Il entre dans la composition d'enzymes catalytiques comme les ATPases.
- Augmentation de la résistance, il permet un développement normal des racines
- Améliore la maturation des fruits et des graines.

Des rôles agronomiques indéniables :

- Maintient la structure des sols par la floculation des colloïdes permettant une bonne perméabilité à l'eau et à l'air ainsi que la stabilité du substrat contrairement aux ions monovalents (Na^+ , K^+ et H^+).
- Régularisation du pH du substrat grâce à l'apport de bases liés au calcium dans les amendements.

NB : Les plantes calcifuges plantées dans un substrat calcaire vont absorber un excès de calcium qui les intoxique.

2.1.4. Les carences calciques.

Le calcium étant peu mobile, c'est les jeunes feuilles qui présenteront les premiers symptômes.

- Empêche le transport de la matière sèche et provoque une chlorose.
- Arrêt du développement racinaire, enroulement et gaufrage des feuilles.
- Autolyse des cellules, anomalies membranaires accompagnées de la production de substances brunes provoquant la coloration des feuilles.
- Les amendements calciques ayant une action directe sur le pH, les substrats carencés en calcium deviennent acides ce qui rend l'assimilation des différents éléments plus difficile voire impossible (P, K, N, Ca, Mg, S, Mo). De plus les oxydes métalliques deviennent quand à eux plus solubles (Fe, Mn, Cu, Zn, Al) et une toxicité de ces ions métalliques s'installe dans la plante.



2.1.5. Les excès calciques.

- antagoniste du fer, l'excès de calcium réduit considérablement son assimilation induisant dès lors une chlorose ferrique.
- Le phosphore se cristallise progressivement en phosphate tricalcique ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)
- Insolubilisation du manganèse et du bore provoquant des carences. Des carences en cuivre et en zinc peuvent également se faire sentir.

2.2. Le magnésium (Mg).

On le retrouve à raison de 0.1 à 0.7% dans la matière sèche ; il est exprimé sous la forme de MgO. C'est l'élément clé de la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique. Le magnésium est très mobile dans la plante.

Il est localisé dans les feuilles et surtout dans les plus vieilles. Les racines ne contiennent que très peu de magnésium.

2.2.1. Les différentes sources de magnésium.

Dans les minéraux magnésiens, les sulfates sont les plus altérables suivit des carbonates et des alumin-silicates qui le sont peu.

Le magnésium échangeable sous forme de Mg^{2+} provenant soit de la dissolution des carbonates magnésiens soit de l'hydrolyse des minéraux silicatés formant des argiles de type chlorite.

2.2.2. L'administration du magnésium et son assimilation.

L'apport en magnésium s'effectue en même temps que l'apport calcaire ([cf. point 2.1.2.](#))

2.2.3. Les rôles physiologiques et agronomiques du magnésium.

- Atome central de la molécule tétrapyrrolique des chlorophylles. Il participe également à la synthèse de la xanthophylle et des carotènes donnant la pigmentation des feuilles.
- Activateur des ATPases ainsi que catalyseur de nombreuses réactions biochimiques (glycolyse, synthèse des glucides, etc.) dans lequel est engrangé le phénomène de phosphorylation.
- Tout comme le calcium et le potassium, le magnésium va neutraliser les acides organiques avec la formation de cristaux tels que l'oxalate, le citrate ou le tartrate de magnésium dans la vacuole cellulaire. Il a donc un rôle de régulation du pH cellulaire.
- Intervient dans le fonctionnement des chloroplastes.
- Permet la liaison entre les deux sous-unités des ribosomes responsables de la transcription de l'ADN en protéines.
- Favorise l'assimilation et la migration du phosphore dans la plante et dans les graines pour former la phytine et les lipides.
- Favorise la formation des fruit et des graines.
- Élève la teneur en vitamine A et C
- Augmente la turgescence par l'hydratation des tissus.

Les rôles agronomiques du magnésium sont semblables à ceux du calcium.

2.2.4. Les carences magnésiennes.



Source : 6.

Le magnésium migre aisément dans la plante, les feuilles âgées sont les premières à être sujettes aux carences.

- Chlorose internervaire. Le limbe pâlit et jaunit excepté les nervures et la zone

directement adjacente. Ceci est lié à la destruction de la chlorophylle ou au blocage de sa formation dans les zones lointaines des nervures, celles-ci étant les dernières irriguées.

- La chlorose est suivie de nécroses brunâtres.
- Diminution de la taille des chloroplastes et de leur structure.
- Chute prématurée des plus vieilles feuilles surtout chez les fruitiers.

Ces carences se rencontrent dans les substrats acidifiés, lixiviés, comportant une forte teneur en calcium et en potassium.

Il est à noter que les engrais riches en nitrates masquent légèrement la carence tandis que les engrais ammoniacaux la renforcent.

2.2.5. Les excès magnésiens.

- Brûlure marginale sur les vieilles feuilles qui deviennent vert foncé.

2.3. Le soufre (S).

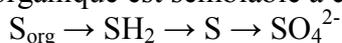
Compose la matière sèche à raison de 0.1 à 0.6% et est exprimé en SO_3 . Le soufre est considéré comme un élément plastique et catalytique.

2.3.1. Les différentes sources de soufre.

Le soufre se retrouve sous trois formes dans les sols :

- Composant de la croûte terrestre sous forme de sulfures et de sulfates, notamment dans les roches volcaniques. La forme minérale est composée de FeS_2 , CuFeS_2 (calcopirite) et surtout le gypse (CaSO_4). La forme SO_4^{2-} est fortement lixiviable.
- Les amendements organiques dans lequel le soufre est sous forme de protéines sulfureuses issus de la décomposition des animaux et végétaux. Il constitue l'essentiel du soufre dans le sol.
- L'atmosphère qui contient de l'anhydride sulfureux (SO_2) issu de la combustion pétrolière ainsi que des éruptions volcaniques. Il est redistribué aux sols par les pluies et est directement absorbé par les feuilles.

La minéralisation du soufre organique est semblable à celle de l'azote.



2.3.2. L'administration du soufre et son assimilation.

On estime que 90% des apports de soufre sont assurés par les pluies. Les 10% restant sont assurés par la minéralisation des substrats, les produits phytosanitaires et les engrais.

L'apport de soufre permet de lutter contre une trop forte alcalinisation des substrats et ainsi empêcher les blocages d'autres éléments tels que le manganèse

L'assimilation s'effectue sous forme de sulfates au niveau des racines et de SO_2 au niveau du feuillage. Il est peu mobile dans la plante ce qui fait que les carences se manifeste d'abord sur le jeune feuillage. Il peut être conservé dans le suc cellulaire provisoirement.

On le trouve dans la plante sous forme minérale (CaSO_4), organique (éthers et protéines sulfurés, les essences aromatiques, l'acide sulfo-cyanique).

2.3.3. Les rôles physiologiques et agronomiques du soufre.

- Il entre dans la constitution de trois acides aminés (la cystéine, la cystine et la méthionine) et donc dans de nombreuses protéines.
- Il compose les molécules organiques volatiles et aromatiques.
- Il est impliqué dans la synthèse des vitamines
- Constituant du coenzyme A jouant un rôle important dans le métabolisme lipidique et glucidique ce qui le rend important dans les essences à graines oléagineuse, les plantes médicinales et aromatiques.
- Composant de différentes enzymes.

2.3.4. Les carences en soufre.

Assez rare si les plantes sont arrosées à l'eau de pluie.

- Chlorose occasionnée par le défaut d'enzymes nécessaire à la fabrication de la chlorophylle.
- Plantes chétives.
- Similarité avec les carences en azote
- Diminution de l'assimilation des nitrates avec augmentation de composés aminique et amidiques.



2.3.5. Les excès en soufre.

- Accumulation excessive de sels
- Perturbation de l'assimilation du molybdène.

3. Les oligo-éléments

Les oligo-éléments sont des éléments indispensables au bon fonctionnement du métabolisme de la plante mais dans des proportions relativement faibles.

Ils ont des rôles essentiellement catalytiques et métaboliques.

Leurs points communs, c'est leur possibilité d'être chélaté c'est à dire d'être lié à des molécules organiques stables facilement assimilable pour la plante et également la possibilité de changer de valence.

3.1. Le fer (Fe).

De 10 à 1000ppm dans la matière sèche. Les tissus les plus âgés sont plus riches en fer que les organes les plus jeunes.

3.1.1. Les différentes sources de fer.

Le fer lié, provenant des minéraux primaires (roches ignées : olivines, pyroxènes, hématite, magnétite et autres) ou le fer se trouve sous la forme Fe^{2+} . Des minéraux secondaires, très hétérogènes.

La forme libre est constituée par les oxydes et hydroxydes. Le fer se présente sous forme de Fe^{3+} en conditions d'oxydation. On trouve $Fe(OH)_3$; $Fe(OH)_2^+$; $Fe(OH)^{2+}$ selon le pH qui se lie à l'argile et l'humus. En absence d'air, le Fe^{3+} est réduit en Fe^{2+} .

La forme organique. Là, le fer est complexé par chélation à la matière organique : la fermentation anaérobie de la matière organique produit des acides fulviques (tartrique, citrique, salicylique...) capable de complexer le fer (et d'autres minéraux) ; ils sont très solubles à pH 7 mais beaucoup moins à pH acide contrairement aux sels de fer. Ces chélates sont donc très utiles pour combler les problèmes de carences.

Un équilibre rédox régit les transformations du fer : $Fe^{2+} \leftrightarrow Fe^{3+} + 1e^-$.
L'élévation du pH favorise la réaction directe tandis qu'en conditions anaérobies, c'est le sens inverse qui est favorisé.

3.1.2. L'administration du fer et son assimilation.

Un des grands problèmes du fer est de le maintenir en solution dans les engrais ; il précipite facilement avec les autres ions présents.

Le fer est intégré dans une phosphoprotéine (la phytoferritine) qui est une protéine d'accumulation constituant la forme de réserve de fer dans la cellule pour la photosynthèse.

Dans les engrais composés, le fer est souvent ajouté sous forme de chélates dont le plus courant est l'Fe-EDTA (Ethylène diamine tétra-acétique de fer) qui permet sa complexation et empêche sa précipitation.

Le fer est assimilé sous la forme ferreuse (Fe^{2+}).

Les plantes riches en Fe : l'épinard, la laitue, le chêne, le riz et la majorité des fruitiers.

Les racines vont absorber et se saturer en Fe avant de laisser passer le surplus dans la tige ce qui traduit le caractère paresseux du fer.

3.1.3. Les rôles physiologiques et agronomiques du fer.

- Source de transporteur d'électrons notamment dans les photosystèmes des chloroplastes et dans la chaîne de transport des électrons des mitochondries en changeant de valence.

$$\text{Fe}^{2+} \leftrightarrow \text{Fe}^{3+} + 1e^{-}$$
- Élément de liaison entre certaines protéines et enzymes.
- Il se situe au centre du noyau tétrapyrrolique appelé hème des enzymes et joue un rôle de capteur d'électrons des réactions.
- Il joue un rôle important dans l'oxydo-réduction des nitrates, des sulfates.
- Participe à la formation de la chlorophylle sans en être un composant.
- Fait partie du fonctionnement des chloroplastes.

3.1.4. Les carences en fer.



Source : 6.

Les carences sont assez fréquentes et provoquées par un pH trop élevé. Dans ces conditions, le fer précipite sous forme d'hydroxyde insoluble. De plus, le fer sous forme colloïdale à charge négative précipite avec le calcium.

Le fer est peu mobile dans la plante, les carences s'observent sur les jeunes feuilles en premier.

L'excès de Zn ou de Mn (en sol acide surtout) peut diminuer l'absorption du fer.

La carence se manifeste par :

- Une chlorose dû au blocage de la synthèse de la chlorophylle. Elle apparaît d'abord sur le limbe, les nervures restant vertes et se détachant très bien du fond de couleur jaune citron à blanc.
- Des nécroses suivent la chlorose.

3.2. Le manganèse (Mn).

Présent dans la matière sèche à raison de 10 à 1000ppm tout comme le Fe.

3.2.1. Les différentes sources de manganèse.

Source minérale : Les différents minéraux de Mn (biotite, augite, muscovite) et les formes d'oxydes (MnO_2 ; Mn_2O_3 ; Mn_3O_4). Ces minéraux sont peu altérables, le Mn soluble est en quantité minime dans le sol. L'ion Mn^{2+} est plus soluble que l'ion Mn^{3+} , il est donc plus assimilable sous cette forme. Néanmoins il existe des formes minérale qui sont directement assimilable par la plante telle que la manganite [$\text{MnO}(\text{OH})$].

Source organique : cet apport est essentiellement composé de chélates de Mn.

Source microbienne : la flore manganéuse oxydante ou réductrice permet de maintenir l'équilibre entre les deux ions Mn^{2+} et Mn^{3+} . Elle permet également la dégradation des minéraux de Mn présenté ci-dessus.

3.2.2. L'administration du manganèse et son assimilation.

Pour combler les carences, on ajoute du sulfate de manganèse (MnSO_4) ou de l'acétate de manganèse $\{\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2\}$.

L'ion assimilable du Mn est l'ion Mn^{2+} .

On retrouve le Mn dans les racines et la plante sous deux formes : une forme de réserve qui est non échangeable et une forme échangeable et labile qui peut être transportée dans la plante.

Les tissus jeunes sont les plus riches en manganèse.

3.2.3. Les rôles physiologiques et agronomiques du manganèse.

Le Mn joue un rôle important dans la respiration (synthèse d'ATP), la photosynthèse et la synthèse des protéines :

- Réduction des nitrates en nitrite et en $-\text{NH}_2$,
- Stimulation de la formation des hydrates de carbone.
- En fait, il est nécessaire à la 'cassure' du CO_2 et de H_2O pendant la photosynthèse

Il fait partie de nombreuses enzymes intervenant dans la libération d'énergie (cycle de Krebs). Il participe à la formation de la chlorophylle.

3.2.4. Les carences en manganèse.

Elles sont fréquentes en sol organique et basique. Les symptômes visuels de carences apparaissent donc en premier lieu sur les feuilles âgées (contrairement au Fe).

Il en résulte un abaissement de la chlorophylle et donc l'apparition d'une chlorose.. En général, la chlorose débute dans le limbe, les nervures restant vertes plus longtemps.

Avec une carence très prononcée, les feuilles brunissent et se nécrosent sur les bords puis entre les nervures.

Les carences en manganèse sont souvent associées à une carence en Fe car le Fe et le Mn sont en équilibre rédox dans le sol : $\text{Mn}^{3+} + \text{Fe}^{2+} \leftrightarrow \text{Mn}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$. La réduction (sens \rightarrow) est favorisée en sol tassé, c'est à dire en conditions anaérobies et acide.



Les sols légers et bien aérés sont des sites de préférences pour l'apparition des carences. On note une augmentation de la teneur en NH_3 dans la plante suite à la pénétration de micro-organismes qui dégradent la matière azotée et diminuent l'assimilation de CO_2 .

Un remède à la carence est de distribuer un engrais foliaire contenant du sulfate de Mn, l'apport d'engrais contenant du Mn tels que les superphosphate set scories. Attention que les scories ont une action basique et les superphosphate une action acidifiante ce qui influe sur le pH du sol et donc sur l'assimilabilité du Mn.

3.2.5. Les excès de manganèse.

À l'inverse des carences, les sols acides favorisent la forme assimilable. Le manganèse peut s'accumuler dans les plantes et devenir toxique.

Les symptômes ressemblent à ceux de la carence, il est donc impossible de déterminer si on se trouve en face d'une carence ou d'un excès en Mn par l'observation des symptômes. On vérifiera donc le pH pour se faire une idée.

On guérit l'excès par modification du pH par chaulage.

3.3. Le cuivre (Cu).

On le retrouve à raison de ± 10 ppm de la composition minérale des végétaux. Les racines en sont plus riches que les parties feuillées.

3.3.1. Les différentes sources de cuivre.

Formes minérales : chalcopryrite, CuFeS_2 , carbonates et phosphates.

Selon les sols, la teneur en Cu est très variable (de 3 à 100ppm) dont une petite partie est assimilable (0,5 à 0,7ppm). Le Cu est fortement immobilisé par la matière organique. La matière organique basique est facilement minéralisable, le Cu sera donc présent en quantité suffisante pour la plante tandis que l'humus acide fixe fortement le Cu.

Les chélates de Cu sont moins fixés par le sol que le sulfate de Cu (CuSO_4) et sont absorbés en doses plus élevées jusqu'à devenir toxique.

3.3.2. L'administration du cuivre et son assimilation.

Souvent apporté sous forme de CuSO_4 (bouillie bordelaise) ou d'oxychlorure (Cu_2Cl_2). Apport de compost urbain contenant suffisamment de Cu, ou de scories cupriques (contenant également du Co).

3.3.3. Les rôles physiologiques et agronomiques du cuivre.

- C'est un élément essentiel de certains enzymes et il joue un rôle dans la respiration.
- Le cuivre s'associe à certaines protéines à caractère de ferments telles que l'uréase, l'oxydase de l'acide ascorbique qui oxydent la matière organique.
- Au niveau de la respiration, le Cu intervient dans le stade où l'hydrogène est libéré dans le cycle de Krebs pour produire de l'eau en final.
- Oxydant du fer dans la plante rendant le fer inassimilable.
- Rôle indéniable dans la protection préventive des maladies cryptogamiques.
- Participe à la synthèse des lignines.
- Rôle important au moment de la floraison notamment sur l'initiation florale.
- Participe à la fixation de l'azote.

3.3.4. Les carences en cuivre.

Les carences en cuivre sont en général assez rares.

- Provoque l'accumulation du fer assimilable dans la plante.
- Dans un premier temps, le feuillage prend une teinte vert bleuté.
- Ensuite, s'installe une chlorose par plage sur les jeunes feuilles en premier lieu. Ceci est dû à la destruction de la membrane des chloroplastes. Le Cuivre présent en suffisante est mobile dans la plante mais devient peu mobile lors d'une déficience.



- Malformation du limbe, enrroulement et gaufrage.
- Perte de la rigidité des tissus par le manque de lignine.
- Diminution de l'initiation florale
- Induction d'une stérilité mâle chez certaines plantes.

Les conditions d'apparition : opposées à celle du Fe et du Mn, elle se manifeste en

sol acide et à humus réducteur. La carence apparaît également en sol mal aéré, mal drainé, en sol sableux au cours des années sèches.

Un surdosage en P peut accentuer la carence en Cu.

3.3.5. Les excès de cuivre.

Diminue le Fe assimilable et augmente la réaction d'oxydation bactérienne du Mn provoquant une carence en Fe et Mn.

L'excès de cuivre diminue la photosynthèse ; les symptômes ressemblent à ceux d'une carence ferrique.

3.4. Le zinc (Zn).

Présent en infime quantité dans le sol ainsi que dans la plante, le Zn est présent autour de 10ppm dans la matière sèche.

3.4.1. Les différentes sources de zinc.

Les différents minéraux de Zn et l'EDTA de Zn sont très bien assimilés par la plante s'ils sont mélangés à d'autres sels (ex. CaCl_2).

Le Zn est plus présent dans les sols acides que dans les sols calcaires ce qui va influencer son absorption.

Dans le sol, le Zn est très bien retenu par la couche superficielle ; sa fumure n'est nécessaire que une fois tous les 3-4 ans.

3.4.2. L'administration du zinc et son assimilation.

L'apport de Zn se fait essentiellement par ajout de sulfate de Zn (ZnSO_4) ou sous forme d'EDTA de Zn. Chaque type d'engrais ou d'amendement est associé avec du CaCl_2 qui augmente sa concentration dans les feuilles.

Il existe un antagonisme entre le P et le Zn diminuant l'absorbabilité du sol et très certainement dû à la formation de Zn insoluble (ex $\text{Zn}(\text{OH})_2$) mais, vu sa forte rétention par le sol, ce phénomène arrive assez rarement.

Plus le sol sera alcalin, moins la plante va absorber du Zn et cela surtout au stade juvénile, pendant lequel on observe un effet antagoniste entre le Ca et le Zn.

Le Zn est absorbé par la plante sous forme d'ions Zn^{2+} . Il s'accumule dans les feuilles âgées et les racines et est peu mobile dans la plante.

3.4.3. Les rôles physiologiques et agronomiques du zinc.

- Fait partie de différentes enzymes tel que l'enzyme anhydrase responsable de la catalyse de la dégradation l'acide carbonique ($H_2CO_3 \leftrightarrow CO_2 + H_2O$) mais également dans la triphosphate déshydrogénase intervenant dans la glycolyse (catabolisme du glucose)
- Intervient également dans les phénomènes de respiration et de fermentation.
- Il joue un rôle important dans la synthèse de l'auxine (AIA ou Acide IndolAcétique)
- Le Zn est indispensable aux processus d'oxydo-réduction.
- Il intervient également dans l'élaboration chlorophyllienne.
- Intervient dans le métabolisme du soufre.
- Aurait probablement un rôle dans la réduction des nitrates et des phosphates.

Diminution des effets causées par un manque en N et de P mais aggrave les effets d'un manque en K, Ca et Mg.

3.4.4. Les carences en zinc.

Lors d'une carence en Zn, on observe :

- Une augmentation de la teneur en glucides rendant la plante moins « dynamique » avec son milieu et plus sujette aux maladies et ravageurs.
- Un arrêt de la production d'auxines avec comme conséquence, l'inhibition du ou des boutons terminaux.
- Accumulation des nitrates et phosphates ;



Dans les symptômes visibles, nous trouvons, en premier lieu sur les feuilles jeunes :

- Une chlorose.
- Le raccourcissement des entrenoeuds, avec formation d'une rosette de petites feuilles raides.
- Formation des graines interrompues ou non initiées.

Pour résoudre les carences en Zn, il est bon de savoir que les engrais sous formes d'EDTA sont plus vite assimilable que les sels minéraux (voir point 3.4.2.)

3.4.5. Les excès de zinc.

Se manifeste par l'apparition d'une chlorose accompagnée d'une pigmentation rouge dans les pétioles et les nervures foliaires.

3.5. Le bore (B).

Tout comme le zinc, le bore est présent à environ 10ppm dans la matière sèche.

3.5.1. Les différentes sources de bore.

Les sources principales de B sont la tourmaline (silicate d'aluminium et de bore contenant 3-4% de B) et l'eau de mer.

Le bore est un élément assez lixiviable mais il est maintenu dans le sol par complexation avec les matières organiques.

3.5.2. Le B dans la plante

Les plantes jeunes consomment plus de Bore que les plantes adultes. Il est très mobile dès l'absorption par les racines mais devient presque immobile dans les feuilles.

À noter que les dicotylées pompent plus de bore que les monocotylées.

Par le phénomène de guttation, les plantes peuvent perdre jusqu'à 80% du bore contenu dans les feuilles pour se prémunir d'une toxicité en cet élément.

3.5.3. L'administration du bore et son assimilation.

L'apport de bore se fait essentiellement sous forme de borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot x\text{H}_2\text{O}$).

Le bore est absorbé par la plante sous forme d'ions (H_2BO_3^-)

3.5.4. Les rôles physiologiques et agronomiques du bore.

- Transport et utilisation des hydrates de carbones par formation de complexe stable avec l'acide borique.
- Régulation de la photosynthèse
- Maintien de l'élasticité des parois cellulaires ainsi que l'intégrité de la membrane cytoplasmique.
- Élongation et division cellulaire des bourgeons apicaux racinaires ou caulino-foliaires.
- Action dans la synthèse des acides nucléiques.

3.5.5. Les carences en bore.



Source : 7

Au moyen d'un microscope, on peut déceler le tout premier symptôme de carence en B. on observe chez les jeunes plantes une prolifération générale du tissu mais les jeunes cellules sont incapables de différenciation (ou de spécialisation).

Au stade bénin, on note un retard de croissance dû à une production excessive de phénols inhibant l'enzyme AIA-oxydase provoquant un excès d'auxines.

Au stade aigu, les symptômes se manifestent sous forme soit de déformation et de gauffrages du feuillage soit des taches décolorées du limbe suivies d'un brunissement et d'un noircissement. Également présence de craquelure sur les tiges et pétioles.

Les carences en B se rencontrent dans les sols lourds ou alcalins, ou alors dans les sols sujets à une forte lixiviation (sols légers et acides).

Une fumure trop riche en K diminue l'absorption du B qui lui-même favorise l'absorption du K.

Remèdes : traitement curatif par pulvérisation foliaire d'une solution de borax ($\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$).

3.5.6. Les excès de bore.

Ils peuvent être dû aux engrais potassiques contenant du borax ainsi que par l'irrigation avec de l'eau boriquée.

Comme dit plus haut, il y a augmentation du phénomène de guttation (pour rappel, la guttation est l'exsudation d'eau sous forme liquide le long de la marge foliaire lorsque la transpiration ne suffit plus à elle seule). L'eau de guttation contient ici le bore excédentaire qui cause des brûlures, le brunissement et le dessèchement du bord foliaire.

3.6. Le molybdène (Mo).

De l'ordre de 1 et 0.001ppm dans la matière sèche, le Mo est assez mobile dans la matière sèche.

3.6.1. Les différentes sources de molybdène.

Les minéraux : Olivine, Molybdenite (MoS_2), CaMoO_4 . les roches acides sont presque toujours plus riches que les roches calcaires.

Dans le sol, on retrouve moins de 1 ppm de Mo mais jusque 100ppm dans certains cas exceptionnels. La partie échangeable représente 0,1 à 0,5ppm et augmente avec le pH. Les formes présentes dans le sol sont le MoO_3 et MoO_2 qui sont peu assimilable mais également du Mo_2O_5 , plus assimilable.

3.6.2. L'administration du molybdène et son assimilation.

Le Mo est capté par la plante sous forme d'anions MoO_4^{2-} et HMoO_4^- .

L'assimilation du Mo diminue avec le pH par l'apparition de composés insolubles avec le Fe ($\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$).

3.6.3. Les rôles physiologiques et agronomiques du molybdène.

- Indispensable aux Fabaceae pour la formation des nodules dans lesquels est possible la fixation du N_2 par les microorganismes symbiotiques
- Intervient dans l'élaboration de l'acide ascorbique ou vitamine C.
- Intervient dans la réduction des nitrites en radical $-\text{NH}_2$.
- Transporteur d'électrons.

3.6.4. Les carences en molybdène.



Se rencontre en sols tourbeux, acides et ferrugineux et en sols présentant un excès de Mn (sols acides). Les sols bien pourvus en P et les excès de nitrate accentue la carence en Mo par insolubilisation dans le sol.

Les symptômes sont surtout observés sur les feuilles âgées :

- Une chlorose généralisée ou localisée suivie d'un flétrissement des bords foliaires. S'en suivent des taches nécrosées.
- Développement irrégulier du limbe, des déformations des tiges et pétioles.
- Augmente le taux de respiration et de la teneur en chlorophylle.
- Teneur peu élevée en acides aminés.

Remèdes : chaulage et pulvérisation de molybdate à 0.1%.

3.6.5. Les excès de molybdène.

Les excès interviennent dans les sols organiques, acides et à drainage défaillant. On peut remédier à un léger excès par l'administration de sulfate de calcium qui permet aux végétaux de supporter des doses légèrement plus élevées en Mo.

4. Les autres éléments utiles

Ces différents éléments peuvent être utiles mais toutes les plantes ne les utilisent pas tous. De plus, passés une certaine dose déjà très faible, certains de ces éléments deviennent toxiques.

4.1. L'aluminium (Al)

Il est également un des principaux constituants des sols, on le retrouve en grande quantité dans la plante. L'utilité de cet élément n'a pas encore été prouvée à cause des outils de test qui contiennent également de l'Al empêchant sa disparition totale dans les plantes.

4.2. L'arsenic (As)

Est présent en quantité minime. Il provient des usines où il est nécessaire à l'élaboration de certains engrais et insecticides.

Cet élément est un stimulant mais il devient très vite toxique ; les excès ne sont qu'accidentels, le sol immobilisant très bien l'As notamment les sols alcalins.

4.3. Le cadmium (Cd)

Très peu absorbé excepté en cas de fumure par du superphosphate.

4.4. Le césium (Cs) et le rubidium (Rb)

S'accumulent dans les racines et deviennent très vite toxiques. Cependant, ils peuvent être relâchés dans le milieu par un élément antagoniste qu'est le potassium (K)

4.5. Le chlore (Cl)

Le chlore est apporté par la mer et les engrais. Il est très lixiviable dans les sols de bonne qualité pédologique. Il est par contre responsable avec le sodium (Na) des problèmes de salinité des sols mal irrigués.

Selon les espèces, les plantes peuvent être peu pourvues à fortement pourvues en Cl.

Son utilité physiologique n'est pas certaine mais il est toujours lié à un cation nécessaire (K^+ , Na^+ , NH_4^+)

La plante absorbe peu de chlore que le sol en soit fortement ou peu pourvu.

Les excès induisent une moindre quantité de sucre.

4.6. Le cobalt (Co)

On ne connaît que peu de chose sur le(s) rôle(s) physiologique du cobalt dans la plante ; il serait nécessaire à la formation des nodosités des légumineuses.

4.7. Le Fluor (F)

Provenant de roches fluorées et des engrais. Il est répandu dans les sols et les plantes. Il agit comme stimulant mais n'a pas de fonction précises.

4.8. L'iode (I)

Issus des roches calcaires qui en sont très riches par rapport aux roches acides. Mais également de la mer qui est la source principale d'I

Il aurait non pas un rôle physiologique mais bien un rôle phytopharmaceutique contre certains virus.

Il est très utile à toutes les plantes en doses très minimales. L'iodate (IO_3^-) est assimilé plus vite que l'iodure (I) surtout au stade jeune ou la plante est plus sensible à l'excès d'iode.

4.9. Le sélénium (Se)

Très peu présent dans les plantes dans lesquels il s'accumule sans devenir pour autant toxique. Il est même utilisé dans les cultures de coton contre l'attaque de certains insectes.

Il est bien plus toxique pour les animaux que les végétaux.

Des plantes indicatrices de sols riches en Se : Stanley, Onoposis, Xylorrhiza et Astragalus.

Il pourrait remplacer une partie du S dans ses rôles physiologiques mais dans des quantités extrêmement faibles.

4.10. Le silicium (Si)

Il constitue la grande masse de la couche terrestre dans lequel il est présent pour $\pm 60\%$.

Très présent également dans la plante. Les plus riches en silices sont les équisétacées (prêles), les fougères, les conifères, les palmiers, les chênes, les bouleaux, les ormes, les frênes, les graminées, les cypéracées mais également les orchidées.

On le retrouve dans la membrane cellulaire, les organes de transpiration, le duramen et le long des vaisseaux de conduction (phloème, xylème et les cellules associées). Il est donc rejeté dans les zones peu actives les rendant plus raides et cassant.

Le Si n'aurait aucun rôle physiologique apparent à jouer mais tout comme pour l'aluminium, il est présent dans tous les ustensiles de test rendant l'identification de ses rôles extrêmement difficile.

4.11. Le sodium (Na)

Remplace en partie le K dans la plante en intervenant comme régulateur de pression osmotique

Dans le sol, le Na remplace le K absorbé sur le complexe argilo-humique du sol retenant les ions.

Il est responsable de la salinité des sols ([cf. le chlore](#))

4.12. Le titane (Ti)

Présent dans toutes les plantes, il aurait une fonction dans l'élaboration chlorophyllienne.

4.13. Le vanadium (V)

Semblerait être également un élément-trace nécessaire. Il déprime la production de matière organique en conditions déficientes en lumière. Il stimulerait l'activité de la peroxydase, de l'oxydase phénolique, la catalase...

Il joue un rôle dans la fixation de l' N_2 atmosphérique des Fabaceae.

5. Déterminer une carence ou un excès de manière pratique.

Déterminer une carence/excès en un ou plusieurs éléments n'est pas une chose aisée. En effet, certaines maladies cryptogamiques, bactériennes et virales provoquent des symptômes analogues à des carences.

N'oublions pas que tous les symptômes possibles ne s'expriment pas tous selon le genre, l'espèce, la gravité de la carence ou de l'excès, l'environnement (humidité relative, ensoleillement, etc.)

De plus, lorsque l'on détermine une carence en un élément, il ne faut pas directement le traduire par un manque en l'élément concerné ; cet élément peut être présent en quantité suffisante dans le substrat (voire parfois également dans la plante) mais cet élément est bloqué par un pH trop élevé ou trop peu élevé ou encore par un excès en un autre élément empêchant son assimilation ; c'est ce que l'on appelle effet antagoniste d'un élément sur un autre. La carence est dite induite.

Il sera donc prudent de vérifier :

- D'une part la qualité physique et chimique du sol ou du substrat de départ, qui permettra de connaître les risques de carence éventuels.
- Deuxièmement l'état physico-chimique du sol ou du substrat lors du diagnostic
- Finalement les engrais utilisés (acidifiants $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, neutre KCl ou alcalinisant CaHPO_4). Ce dernier point est peu important si on utilise des engrais composés du commerce qui sont généralement équilibrés.

Le tableau ci-dessous permet de déterminer les causes de carences ou d'excès en éléments selon les caractéristiques observées sur les feuilles dans un premier temps.

Les liens en bleu sont les causes directes de l'observation ; les liens en vert, entre parenthèse, sont les causes de carences induites de l'élément précédent..

Ex : je détermine une carence en Fe, celle ci est due soit à une carence par manque de Fe. Mais elle peut être due à un excès de Ca ou de Cu par action antagoniste bloquant l'assimilation du fer.

<u>Symptôme primaire sur les feuilles</u>	<u>Âges des Feuilles atteintes</u>	<u>Autres symptômes possibles</u>	<u>Carence/excès</u>
<ul style="list-style-type: none"> Chlorose 	<ul style="list-style-type: none"> Agées puis les jeunes Jeunes 	<ul style="list-style-type: none"> Les feuilles prennent une couleur orangée. Nervures prononcées. Feuilles dressées et raides Enroulement et/ou gaufrage des feuilles. Coloration brunes des feuilles Plante chétive Similarité carence N Chlorose du limbe (jaune à blanc) suivit des nervures. nécroses Entre-nœuds court rosette de feuilles. Migmentation rouge sur pétiole et nervures. 	<p>Carence N</p> <p>Carence Ca : (Excès K)</p> <p>Carence S</p> <p>Carence Fe : (Excès Ca) ; (Excès Cu)</p> <p>Carence Zn : (Excès Ca)</p> <p>Excès Zn</p>

Chlorose (suite)	<ul style="list-style-type: none"> • Agées 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécroses. • Chlorose internervaire nécroses brunes. • Chlorose par plage. brunissement et nécroses sur les bords puis les nervures • Flétrissement des bords foliaires. Nécroses. Malformations/déformations du limbe, tiges, pétioles. 	<p>Carence aiguë P</p> <p>Carence Mg : (Excès K) ; (Excès Ca)</p> <p>Carence Mn : (Excès Ca) ; (Excès Cu) Excès Mn</p> <p>Carence Mo : (Excès S)</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Feuilles vert foncé 	<ul style="list-style-type: none"> • Jeunes et âgées. • Agées 	<ul style="list-style-type: none"> • Racines courtes et épaisses. floraison et fructification quasi inexistante. • Feuilles tirant sur le bleuté avec jaunissement Coloration pourpre, ondulation de l'extrémité des feuilles suivit d'un dessèchement. • Brûlures marginales 	<p>Excès N</p> <p>Carence bénigne P</p> <p>Excès Mg</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Feuilles de coloration bronze 	<ul style="list-style-type: none"> • Agées 	<ul style="list-style-type: none"> • Flétrissement Nécroses Ondulation du bord foliaire 	<p>Carence K</p>

<ul style="list-style-type: none"> • Brûlures 	<ul style="list-style-type: none"> • Agées • Jeunes 	<ul style="list-style-type: none"> • Brûlures marginales • Brûlures, brunissement, dessèchement du bord. Guttation 	<p>Excès Mg</p> <p>Excès B</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Coloration pourpre 	<ul style="list-style-type: none"> • Agées • Jeunes 	<ul style="list-style-type: none"> • Feuilles vert bleuté + jaunissement ondulation de l'extrémité des feuilles. dessèchement. • Coloration rouge sur nervures et pétioles. Chlorose 	<p>Carence bénigne P</p> <p>Excès Zn</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Couleur orangée. 	<ul style="list-style-type: none"> • Agées puis jeunes 	<ul style="list-style-type: none"> • Chlorose Nervures prononcées. Feuilles dressées et raides 	<p>Carence N</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Vert foncé tirant sur le bleuté 	<ul style="list-style-type: none"> • Jeunes et âgées • Agées 	<ul style="list-style-type: none"> • Chlorose par plage sur jeunes feuilles. Enroulement, gaufrage, malformation du feuillage. • Jaunissement Coloration pourpre, ondulation de l'extrémité des feuilles suivit d'un dessèchement. 	<p>Carence Cu : (Excès Ca)</p> <p>Carence bénigne P</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Décoloration par taches. 	<ul style="list-style-type: none"> • Jeunes 	<ul style="list-style-type: none"> • Déformation/gaufrages. brunissement/noircissement. Craquelure sur pétioles et tiges 	<p>Carence B : (Excès Ca)</p>

<ul style="list-style-type: none">• Forte guttation	<ul style="list-style-type: none">• Jeunes	<ul style="list-style-type: none">• Brûlures, brunissement, dessèchement du bord.	Excès B
<ul style="list-style-type: none">• Flétrissement	<ul style="list-style-type: none">• Agées et très vite les jeunes.	<ul style="list-style-type: none">• Retard de croissance. Coloration bronze du feuillage. Nécroses. Ondulation du bord foliaire.	Carence K

Bibliographie.

1. *Les bases de la production végétale – Tome I – Le sol et son amélioration* ; Soltner Dominique ; édition 2003 ; Collection Sciences et techniques agricoles.
2. *Les bases de la production végétale – Tome III – La plante et son amélioration* ; Soltner Dominique ; édition 2001 ; Collection Sciences et techniques agricoles.
3. *Les cultures végétales hors sol* ; Morard Philippe ; 1995 ; Publications Agricoles.
4. *Nutrition des plantes de culture* ; Baeyens J. ; 1967 ; éditions Nauwelaerts.
5. *Cours de Fertilisation* ; Graduat techniques et gestion horticoles ; 2002-2003 ; Gembloux.

Photographie

6. <http://www.kali.ch/f/service/dokumentation/naehrstoff/stickstoff.htm>
7. <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/pub811/5fert.htm>
8. <http://membres.lycos.fr/aquariumsphotos/plante/oligo.php>

