

## La nutrition minérale des plantes

Fiche **QUESTIONS SUR...** n° 06.02.Q04

2022, révisée en septembre 2025

Jean-François MOROT-GAUDRY, membre de l'Académie d'Agriculture de France

**Mots clés : nutrition minérale plante, minéraux essentiels, fertilisation**

La nutrition minérale se définit comme l'ensemble des processus biologiques qui permettent aux végétaux d'assimiler – essentiellement par leurs racines – les éléments nutritifs nécessaires à leurs différentes fonctions physiologiques : développement, croissance et reproduction.

Les plantes représentent la principale voie d'entrée des ions minéraux nutritifs, issus du sol, dans la biosphère et en particulier dans les chaînes alimentaires qui conduisent à l'homme.

Sur le plan appliqué, les connaissances acquises dans ce domaine sont utilisées pour gérer au mieux la fertilisation des cultures, de façon rationnelle sur le plan socio-économique, et de façon durable sur le plan écologique.

### Comment et quand a-t-il été montré que certains minéraux sont essentiels à la croissance et au développement des plantes ?

À la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, Lavoisier posa les fondements de la chimie.

Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, de nombreux éléments minéraux – identifiés grâce à la mise au point de méthodes d'analyse spécifiques – furent retrouvés dans les tissus végétaux. Quelques années plus tard, les physiologistes allemands Pfeffer, Sachs et Knop démontrèrent que les plantes peuvent croître sur un substrat inerte, à condition d'ajouter dans l'eau une quinzaine d'éléments minéraux essentiels à leur croissance et à leur développement ; ce fut l'origine de la culture en hydroponie.

### Quels sont les éléments minéraux impliqués dans la nutrition des plantes ?

Outre le carbone C – assimilé par la photosynthèse à partir du CO<sub>2</sub> présent dans l'air – ainsi que l'hydrogène H et l'oxygène O, qui sont les constituants de l'eau et de l'atmosphère, les éléments minéraux nécessaires à la croissance des plantes sont prélevés le plus souvent par les racines sous forme d'ions positifs (les cations) ou négatifs (les anions) ; ces ions sont classés selon leur abondance relative en deux catégories : les macroéléments et les microéléments.

#### Les macroéléments

Le potassium K, le calcium Ca et le magnésium Mg sont prélevés du sol sous forme de cations simples K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>.

Le phosphore est prélevé sous forme d'ions phosphoriques H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> et HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (suivant le pH du sol) et le soufre S l'est sous forme de sulfate SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. L'azote N est prélevé sous forme de nitrate NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ou d'ammonium NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.

Chacun représente au moins 0,1 % et généralement 2 % au plus de la matière sèche de la plante.

Les cations simples K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> permettent de compenser les charges négatives des molécules organiques chargées négativement, suite à la présence d'atomes d'oxygène.

#### Les microéléments

Le chlore Cl est prélevé du sol sous forme d'anion Cl<sup>-</sup>, et le bore B en milieu alcalin sous forme de borate H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

Le fer Fe, le manganèse Mn, le zinc Zn, le cuivre Cu, le molybdène Mo et le nickel Ni sont prélevés sous forme de cations, Fe<sup>2+</sup> ou Fe<sup>3+</sup> (selon les espèces), Mn<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, MoO<sub>4</sub><sup>2-</sup> et Ni<sup>2+</sup>. Leur concentration dans les tissus végétaux varie de 0,01 % pour le chlore Cl<sup>-</sup> et le fer Fe<sup>3+</sup>, à 0,00001 % pour le nickel et le molybdène.

## Rôle des principaux éléments minéraux essentiels

### Les macroéléments

- Le potassium  $K^+$  est le cation inorganique le plus abondant (concentration relativement stable, proche de 10 millimoles par litre dans le liquide constitutif des cellules végétales, le cytosol. Le potassium contrôle le potentiel hydrique et la pression de turgescence (état de tension dû à une forte rétention d'eau dans les cellules végétales). De ce fait, le potassium est impliqué dans le contrôle de l'élongation et de la croissance cellulaire, la régulation de l'ouverture stomatique qui détermine les échanges gazeux  $CO_2$  et vapeur d'eau de la plante ; il intervient également dans la régulation de l'activité de certaines enzymes, et dans le transport et l'accumulation des composés organiques photosynthétiques (sucres, acides aminés) dans les organes de réserve des plantes (graines, fruits, tubercules).
- Le calcium  $Ca^{2+}$  présente une teneur moyenne pouvant être voisine de celle du potassium, mais sa mobilité et sa répartition dans les tissus végétaux est très différente. Il s'associe fortement aux groupes carboxyles spécifiques de la fonction acide  $COOH$  des hémicelluloses et des composés pectiques (composés glucidiques de la paroi cellulaire végétale, assurant la structuration, la stabilisation et la plasticité du squelette pariétal). Dans la vacuole (principal compartiment intracellulaire, rempli d'eau et d'ions),  $Ca^{2+}$  participe à la neutralisation électrique des anions (sulfates, phosphates). Il joue enfin un rôle essentiel en tant que messenger biochimique secondaire du fonctionnement de la machinerie cellulaire végétale.
- Le Phosphore  $P$  du sol est prélevé par les racines des plantes à l'état ionique dissous, sous forme d'ions phosphoriques  $H_2PO_4^-$  ou pyrophosphates  $HPO_4^{2-}$ . Le phosphore entre dans la composition de molécules essentielles à la vie, comme les phospholipides (constituants des membranes cellulaires), les ATP/ADP/AMP (adénosine tri, di et monophosphate), molécules clés de l'énergétique cellulaire, ou encore l'ADN (acide désoxyribonucléique) et l'ARN (acide ribonucléique), supports de l'information génétique. Le phosphore intervient dans la synthèse des sucres, qui sont souvent phosphorylés au cours de leur métabolisme.
- Le Magnésium  $Mg^{2+}$  est un cation bivalent qui s'associe aux groupes phosphates lors de la synthèse de l'ATP. Une autre fonction du magnésium est sa participation à la constitution de la molécule de chlorophylle, pigment vert des feuilles, élément essentiel au déroulement de la photosynthèse.

### Les microéléments

Les microéléments constitutifs de la structure de certaines protéines sont particulièrement impliqués dans les réactions d'oxydo-réduction qui assurent les transferts d'électrons dans le fonctionnement du métabolisme cellulaire.

- Le fer  $Fe^{2+}$  ou  $Fe^{3+}$ , par exemple, fait partie de complexes protéiques comme les cytochromes, les ferrédoxines, etc., assurant le transfert d'électrons de la machinerie photosynthétique des feuilles. Le fer est également impliqué dans la structure de certaines enzymes de la chaîne respiratoire comme la cytochrome oxydase. Il en est de même du cuivre  $Cu^{2+}$  qui intervient dans les mêmes mécanismes.
- Le manganèse  $Mn^{2+}$  joue un rôle déterminant dans le système d'oxydation de l'eau, constitutif du photosystème II de la machinerie photosynthétique.
- Les carences en bore  $B$  sont connues pour perturber le transport des minéraux et des sucres.
- Le molybdène  $Mo^{2-}$  est indispensable au fonctionnement de la nitrate réductase, enzyme clé du métabolisme azoté.
- Le zinc  $Zn^{2+}$  est un élément essentiel de l'expression génétique, car il participe au maintien de la structure de nombreux facteurs de transcription impliqués dans la régulation cellulaire de l'expression des gènes.

## Interactions entre éléments minéraux et nutrition minérale

Entre les éléments minéraux existent des interactions qui font que l'action de l'un est modifiée par la présence d'un autre, et vice-versa :

- synergie entre deux éléments, quand l'effet de l'un est amplifié par la présence de l'autre ;
- antagonisme, quand l'effet de l'un est atténué par la présence de l'autre.

Par exemple, le nitrate facilite l'absorption du potassium, mais une absorption importante de potassium entrave l'absorption de magnésium et de zinc. Il est connu qu'en fertilisation, les cations  $Ca/Mg$  sont antagonistes et que le fer et le zinc interagissent avec les phosphates. Ces considérations amènent les agriculteurs à gérer en connaissance de cause les équilibres entre éléments minéraux lors de la fertilisation.

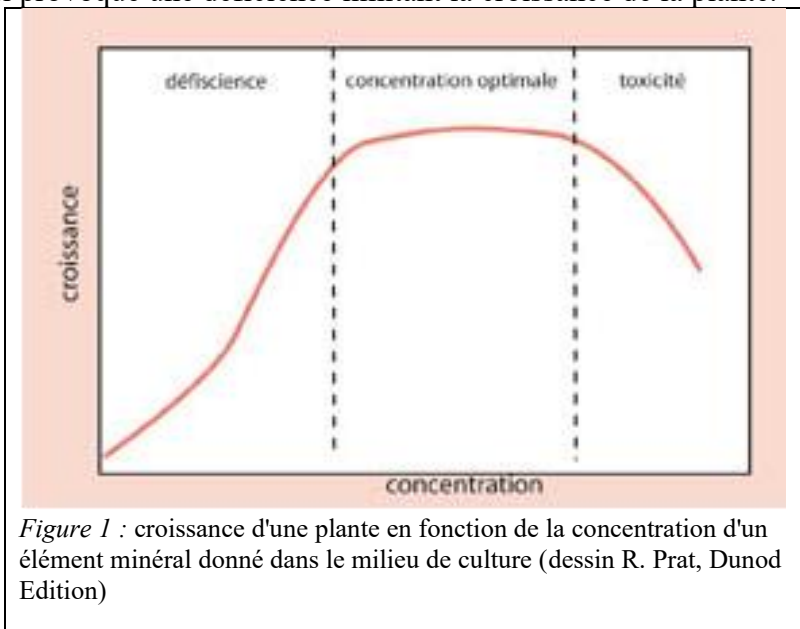
Les nutriments en nitrate et en phosphore sont aussi très intriqués. Il est bien établi que les métaux tels que le fer et le zinc interagissent fortement avec le phosphate, et que les cations  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  sont antagonistes lors de la fertilisation.

### Effet de la variation des ressources minérales sur la croissance (Figure 1)

Quand on détermine la croissance d'une plante (exprimée en % de sa croissance maximale) en fonction de la ressource en un élément minéral, on observe que, dans la partie ascendante de la courbe, la teneur de l'élément dans le milieu est insuffisante, ce qui provoque une déficience limitant la croissance de la plante.

La courbe de croissance atteint ensuite un plateau où la croissance est optimale. Au début du plateau, la concentration minimale en nutriments – qui permet une croissance maximale – est appelée point critique. Au-delà de ce point au plateau, on observe une augmentation de la concentration de l'élément dans la plante (dans la vacuole notamment), qui ne bénéficie pas à la croissance ; on parle alors de *consommation de luxe*.

Pour les concentrations trop élevées en élément minéral, la croissance chute, l'élément devient toxique. Ainsi, un excès de cuivre induit une carence en fer et en manganèse, suivie d'une réduction de croissance.



La carence en nutriment se manifeste par une limitation de croissance et *in fine* par des baisses de rendement.

La carence en azote, par exemple, entraîne une baisse importante de la productivité. La carence en bore chez la betterave entraîne un affaiblissement de la plante, qui devient plus sensible à certains champignons pathogènes, ce qui cause également une baisse importante de productivité.

### Pourquoi utiliser des engrais ?

Chaque année l'enlèvement des récoltes extrait des champs des quantités importantes de sels minéraux (nitrate, phosphate, sulfate, potassium, magnésium, etc.) : en conséquence, les sols s'épuisent en ces éléments. Aussi, pour éviter des carences, ces sels minéraux doivent être restitués, sous forme de fumure organique (fumier, compost, etc.) ou minérale (engrais).

L'emploi d'engrais azotés et phosphatés, notamment, permet de maximiser la production végétale et d'éviter les famines des siècles passés. Mais l'excès d'engrais azotés et phosphatés est la cause de graves problèmes de pollution des sols et des nappes phréatiques, et de l'atmosphère.

La gestion de l'application d'un fertilisant (l'azote par exemple) dans les systèmes de culture consiste à définir la dose permettant de maximiser la productivité, tout en évitant les pollutions de l'environnement (Figure 2).

#### C'est un exercice difficile !

C'est pourquoi les agriculteurs recherchent les itinéraires techniques les mieux adaptés aux conditions de gestion des cultures, de manière à produire suffisamment sans détériorer l'environnement. Ces pratiques demandent

Macro-éléments	Azote	N	100 - 300 kg/ha
	Potassium	K	100 - 400 kg/ha
	Calcium	Ca	40 - 200 kg/ha
	Phosphore	P	20 - 50 kg/ha
	Soufre	S	10 - 40 kg/ha
	Magnésium	Mg	10 - 30 kg/ha
Micro-éléments	Fer	Fe	1000 - 2000 g/ha
	Manganèse	Mn	150 - 700 g/ha
	Zinc	Zn	100 - 300 g/ha
	Bore	B	80 - 200 g/ha
	Cuivre	Cu	25 - 100 g/ha
	Molybdène	Mo	5 - 20 g/ha

Figure 2 : besoins en macro et micro-éléments pour diverses cultures annuelles (source : Y; COÏC et M. COPPENET, 1989)

d'acquérir sans cesse des connaissances scientifiques nouvelles (notamment en écophysiologie), nécessaires pour assurer des bases rationnelles à l'agronomie du futur.

**Ce qu'il faut retenir :**

Pour croître et se développer, les plantes nécessitent la présence d'éléments minéraux, généralement extraits du sol. Ces minéraux, dissous dans l'eau, sont absorbés par les racines des plantes et intégrés aux molécules organiques constitutifs des végétaux, pour assurer le fonctionnement biophysique et biochimique de la "machinerie végétale".

Quand les éléments minéraux font défaut (carence après enlèvement des récoltes par exemple), ces éléments doivent être restitués au sol, sous forme de fumure organique et/ou minérale, en évitant les excès d'application qui pourraient détériorer l'environnement.

**Pour en savoir plus :**

- MOROT-GAUDRY Jean-François : *Biologie Végétale, Tome I , Biologie végétale, Nutrition et Métabolisme*, Dunod Editions, 2017
- MOROT-GAUDRY Jean-François : *Nutrition minérale des plantes, aspects moléculaires*, Les Potentiels de la Science, Académie d'Agriculture de France, 2013
- BRIAT Jean-François, LEMAIRE Gilles, KAMOUN Sophien et MOROT-GAUDRY Jean-François : *Approches systémiques de la nutrition minérale des plantes en biologie et en agronomie*, Séance hebdomadaire de l'Académie d'Agriculture de France du 10 avril 2019