

Chapitre 4 : Caractéristiques et propriétés chimiques du sol

Les végétaux puisent dans le sol une partie des éléments nécessaires à leur développement ; ces éléments sont assimilés sous forme d'ions en solution dans le sol (état soluble dans l'eau du sol) ; outre la partie soluble, il existe d'autres états dans lesquels on peut trouver ces éléments :

- adsorbés sur le complexe d'échange
- insolubilisés sous des formes diverse
- constituants des minéraux primaires et secondaires

De nombreux facteurs vont interagir avec la solution du sol : activité biologique, matière organique, apports de fertilisants, mais aussi le pH.

Dans un objectif de production végétale, comprendre les variations d'états de la chimie du sol permet de comprendre, entre autres, comment les éléments peuvent être plus ou moins disponibles pour les plantes.

1. Le sol, source d'une partie des éléments nécessaires au développement des végétaux

1.1 Les différents éléments nutritifs

Pour se développer, les plantes prélèvent dans le milieu qui les entoure – air, eau, sol – les 18 éléments nécessaires à leur vie et à leur développement. 18 éléments sont donc nécessaires aux végétaux sur les 94 que l'on trouve sur la planète.

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

Les 6 éléments de structure et macro éléments restants : N, P, K sont dit **éléments majeurs** en agronomie ; Ca, Mg, S sont couramment appelés éléments secondaires. Dans les 2 cas, majeurs et secondaires, ils sont absorbés en quantité importantes , avec des teneurs supérieures au g/kg MS d'une plante. Les éléments majeurs ont toutefois des teneurs plus importantes que les secondaires.

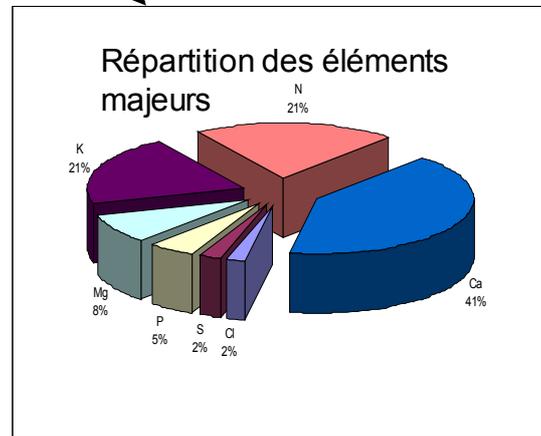
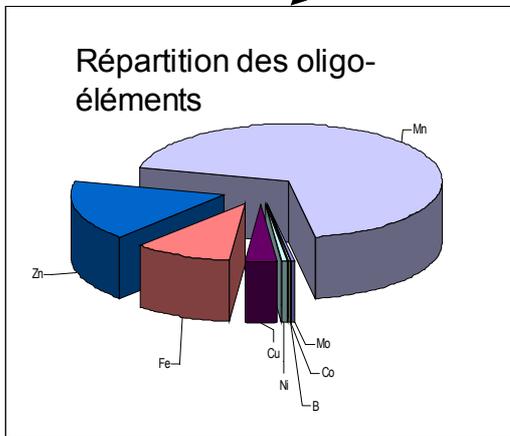
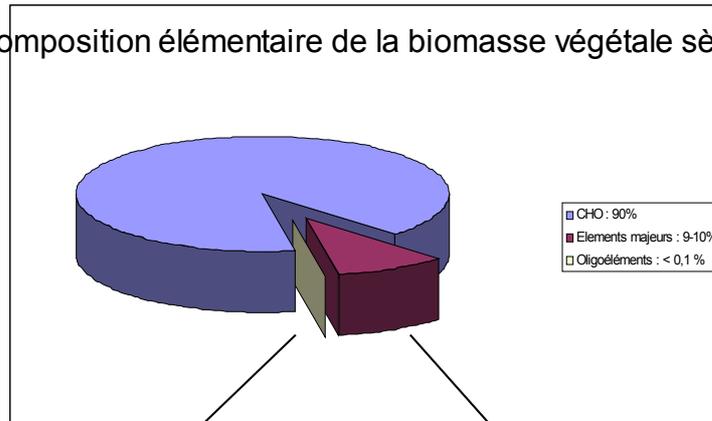
Les 9 autres sont appelés les **oligo éléments** et ont des teneurs de l'ordre du mg ou du dixième de mg/kg de MS des plantes.

Tableau I. Eléments indispensables à l'ensemble des organismes vivants. Il s'agit de teneurs

Eléments	Terre (0-20 cm) (mg kg ⁻¹)	Règne végétal		Règne animal		
		Indispensable Oui/Non	Teneur (mg kg MS ⁻¹)	Indispensable Oui/Non	Teneur (mg kg MS ⁻¹)	
Eléments de structure	C	2.10 ⁴	Oui	4.5.10 ³	Oui	4.10 ³
	H	Origine	Oui	1.10 ⁴	Oui	1.10 ⁴
	O	H ₂ O	Oui	4.10 ⁵	Oui	4.10 ⁵
	N	2.10 ³	Oui	2.10 ⁴	Oui	5.10 ⁴
	P	1.10 ³	Oui	5.10 ³	Oui	1.10 ⁴
	S	5.10 ²	Oui	2.10 ³	Oui	1.10 ³
Macro Eléments	K	4.10 ⁴	Oui	2.10 ⁴	Oui	5.10 ²
	Ca	5.10 ⁴	Oui	4.10 ⁴	Oui	1.10 ⁵
	Mg	2.10 ⁴	Oui	8.10 ³	Oui	4.10 ³
	Cl	3.10 ⁴	Oui	2.10 ³	Oui	2.10 ³
	Na	1.10 ⁴	Non (ref IFA)	4.10 ²	Oui	3.10 ³
Eléments traces	Fe	3.8.10 ⁴	Oui	3.10 ¹	Oui	1.10 ²
	Zn	1.10 ⁴	Oui	5.10 ¹	Oui	1.5.10 ⁴
	Cu	1.8.10 ¹	Oui	1.10 ¹	Oui	2.5.10 ⁰
Eléments Ultra Traces Métaux et Métalloïdes	Mn	5.10 ⁴	Oui	2.10 ²	Oui	3.10 ³
	Mo	2.10 ¹	Oui	5.10 ⁻¹	Oui	1.10 ⁻¹
	F	1.10 ⁷	Non	2.10 ²	Oui	5.10 ²
	I	2.8.10 ⁰	Non	3.10 ³	Oui	4.10 ⁻¹
	B	5.10 ¹	Oui	5.10 ¹	Non	5.10 ⁻¹
	Co	2.10 ⁴	Oui	5.10 ⁻¹	Oui	2.10 ⁻²
	Ni	2.10 ⁴	??	1.5.10 ⁴	Oui	8.10 ⁻¹
	Cr	2.10 ⁴	Non	7.10 ⁻²	Oui	5.10 ⁻²
	Sn	1.10 ⁷	Non mais ??	2.10 ⁻¹	Non	5.10 ⁻¹
	V	9.10 ⁴	Non	1.10 ³	Oui	1.10 ⁻²
	As	5.10 ⁰	Non	1.10 ⁻¹	Oui	5.10 ⁻⁴
	Cd	1.10 ⁴	Non	1.10 ⁻¹	Oui	2.10 ⁻¹
	Se	1.10 ⁻¹	Non	2.10 ⁻²	Oui	1.10 ³
Curiosité	Si	3.10 ⁵	Non	1.10 ³	Non	1.10 ⁴ à 6.10 ³

Les 18 éléments entrent donc à des niveaux de teneurs complètement différents dans la composition des tissus végétaux :

Composition élémentaire de la biomasse végétale sèche

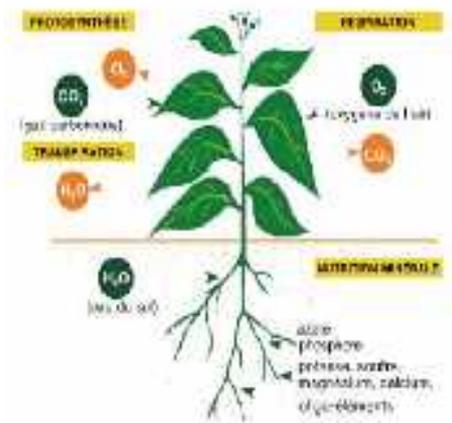


1.2 Les sources des éléments nutritifs

La plante trouve dans l'air, sous forme de gaz carbonique, le carbone et l'oxygène nécessaires à la photosynthèse et à l'assimilation chlorophyllienne.

L'eau prélevée dans le sol, outre ses rôles multiples, fournit hydrogène et oxygène par le mécanisme de l'assimilation chlorophyllienne.

Les sources des éléments nutritifs



Les 15 autres éléments minéraux : N, P, K, Ca, Mg, la plus grande partie de S et les

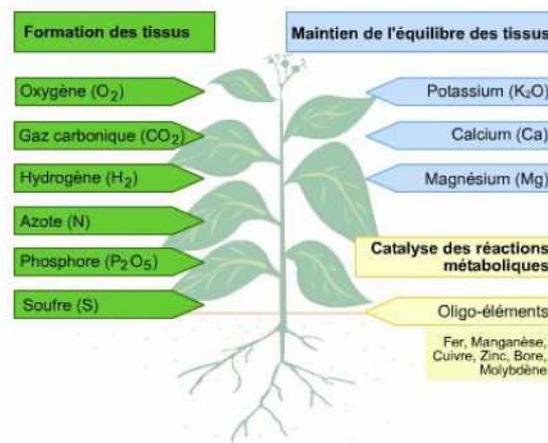
oligoéléments proviennent du sol où les racines les absorbent sous formes ioniques, à partir de solutions très diluées. L'azote est, pour la plupart des plantes, prélevé dans le sol sous forme minérale (nitrique ou ammoniacale), mais pour les légumineuses, il est prélevé dans l'air du sol par les bactéries des nodosités racinaires.

1.3 Le rôle des éléments nutritifs

Les constituants essentiels des tissus végétaux, oxygène, carbone, hydrogène, azote, phosphore, soufre, sont assemblés au cours de la synthèse organique.

Les cations – potassium K^+ , calcium Ca^{2+} et magnésium Mg^{2+} – maintiennent dans le milieu interne un équilibre avec les anions.

Le rôle des éléments nutritifs



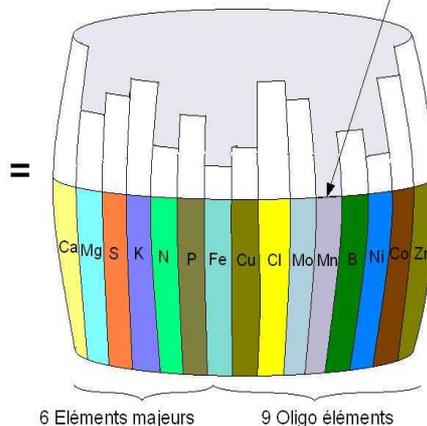
Enfin, les oligoéléments sont des catalyseurs de réactions du métabolisme. Les éléments qui entrent dans la nutrition des plantes forment un tout où chacun d'eux est indispensable.

1.4 Absorption des éléments minéraux

L'absorption par le système racinaire est faite sélectivement. Si l'un des éléments nutritifs est en quantité insuffisante dans le sol, il devient facteur limitant. La croissance de la plante est affectée et des symptômes visibles de carence peuvent apparaître.

Les 3 éléments C, H, O ne sont jamais des facteurs limitants...car disponibles 'à volonté'!

L'élément nécessaire le moins disponible pour la plante est celui qui limite le rendement ...



6 Eléments majeurs

9 Oligo éléments

2. Le complexe d'échange ,capacité d'échange cationique (CEC) et mécanisme d'échange des ions

2.1 Rappel

Nous avons vu que les colloïdes du sol ont à leur surface des charges, majoritairement négatives, et ont donc une capacité à fixer (pas de manière définitive, car les ions restent échangeables...avec la solution du sol) des ions.

Ce complexe d'échange du sol lui procure la propriété d'avoir la capacité d'adsorber et d'échanger des cations (Mesuré par la capacité d'échange cationique : CEC) et des anions (mesurée par la capacité d'échange anionique CEA)

Certains ions peuvent être fixés en grande quantité : Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+

D'autres le sont en petite quantité : Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, NH_4^+ , Fe^{3+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+} ..

On mesure cette caractéristique via la CEC, exprimée en meq/100 g de sol. Rappel : la MO, même si elle représente peu en masse dans le sol (entre 1 et 5% !...) représente entre 20et 50% de la CEC.

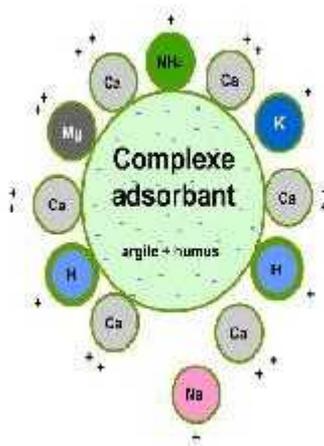
Les colloïdes Argile et MO ont aussi quelques charges négatives, ainsi que le hydroxydes de fer et d'al ; il existe donc aussi une capacité à fixer des ions négatifs.

Ces anions adsorbés sont surtout les phosphates HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- et dans une bien moindre mesure, d'autres ions négatifs plus hydratés : NO_3^- , SO_4^{2-} , HSO_4^- , Cl^- ...

2.2.Les valeurs caractéristiques du complexe d'échange

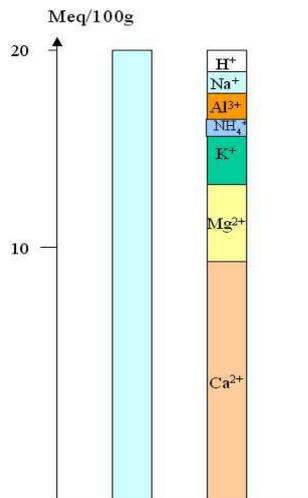
221. La capacité

On peut représenter la CEC d'un sol (que l'on nomme 'T' dans de nombreux livres d'agronomie) et sa 'garniture en ions de plusieurs manières.. De manière très simple et schématique :

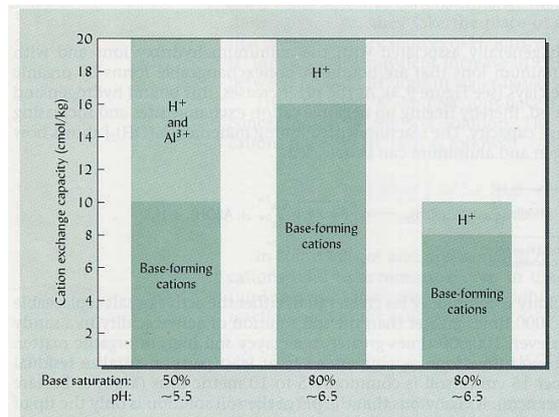


.Ci dessous, la CEC du sol est représentée par la barre de gauche et figurent sur celle de droite une représentation de la part de chaque ion au sein du complexe d'échange.

Exemple de représentation de la CEC
d'un sol et de sa garniture cationique



Ici on représente 3 CEC de 3 sols différents : elles ont des valeurs différentes et la 'garniture e cations l'est aussi.



Comment détermine-t-on la CEC ? On réalise un échange de cations (par exemple avec NH₄⁺), ce qui rovoque une saturation du milieu avec cet ion qui déloge tous les cations du complexe d'échange et prend leur place. La quantité de NH₄⁺ adsorbé est donc égal à la CEC.

222. La somme des 'bases 'échangeables (Ca²⁺,Mg²⁺,K⁺,Na⁺)

La somme de ces 4 cations, donc leur % total s'appelle la somme des bases échangeables. On l'appelle 'S'. On les appelle des bases car si ces ions sont globalement perdus par le sol, cela provoque une hausse des H⁺ et donc une acidification. En réalité, par exemple Ca²⁺ se comporte comme un acide car Ca²⁺ + 2 OH⁻ donne Ca(OH)₂.

223 Le taux de saturation

Le rapport S/T, que l'on appelle V est appelé le taux de saturation du sol. Que traduisent les valeurs de V?

-des faibles taux de saturation signifient que des ions positifs échangeables tels que H⁺, mais surtout Al(OH)₂²⁺ et Al(OH)₂⁺ et Al³⁺ sont présents sur le complexe ; généralement en situation de sol acide ; dans ces cas, d'un point de vue agronomique, il convient d'apporter des cations au sol, en plus d'une base pour augmenter le pH

-au contraire, des taux élevés de V signifient que le sol est bien pourvu en cations, hors Al et H.

2.3 Lois d'échange des cations entre l'état adsorbé et la solution

Au pourtour des colloïdes, il y a en fait un tourbillonnement incessant d'ions, on parle d'essaims d'ions ou encore de double couche. On peut donc parler de 2 solutions dans le sol :

- une solution interne, très proche des colloïdes et qui contient les ions adsorbés à leur surface
- une solution externe, ce sont les ions libres ou non adsorbés, plus éloignés des colloïdes, c'est la solution du sol proprement dite

Les lois d'échange entre ces 2 'compartiments' sont les suivantes :

- 1ere loi** : la somme des cations retenus et échangeables d'une unité de poids d'un sol est constante (à court terme, si le pH ne varie pas, voir plus loin). Cela correspond au fait qu'une unité de poids d'un sol possède un certain nombre de sites d'adsorption en fonction de la quantité de colloïdes qu'il contient et que cette quantité varie peu ou pas à court terme. Donc si un cation est fixé, un autre (ou des autres) doit être échangé
- 2eme loi** : pour un cation donné, un équilibre s'établit entre les cations fixés et ceux qui sont libres dans la solution. Tout départ ou arrivée de cations dans la solution (prélèvement racinaire, lixiviation, apport engrais, minéralisation...) entraîne des échanges complexe-solution jusqu'à l'obtention d'un nouvel équilibre. Par ces échanges, le sol s'oppose ou freine l'ampleur des modifications de la composition de la solution : on dit que le sol a un pouvoir tampon.

2.4 Lien entre CEC et pH du sol

Lorsque le pH du sol diminue (cas des sols non calcaires, décarbonatés), les ions H^+ , plus nombreux dans la solution s'adsorbent selon la 2eme loi de l'échange et 'dégagent' d'autres cations adsorbés qui passent en solution ; il s'ensuit une proportion plus forte de H^+ au sein du complexe d'échange : le taux de saturation décroît. Il en est de même avec les ions Al^{3+} qui deviennent présents en solution en dessous de pH 5,5.

Mais certains ions H^+ (et aussi les ions Al^{3+} , en dessous de pH 5,5) vont avoir la faculté de se lier par covalence (Bounded in english) avec certaines charges – du complexe, réduisant ainsi leur nombre disponibles pour adsorber des ions échangeables.

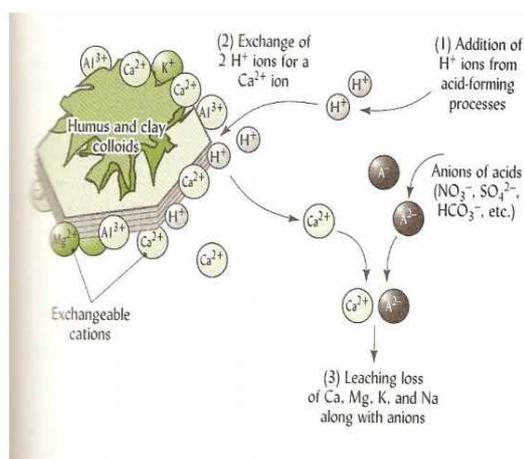
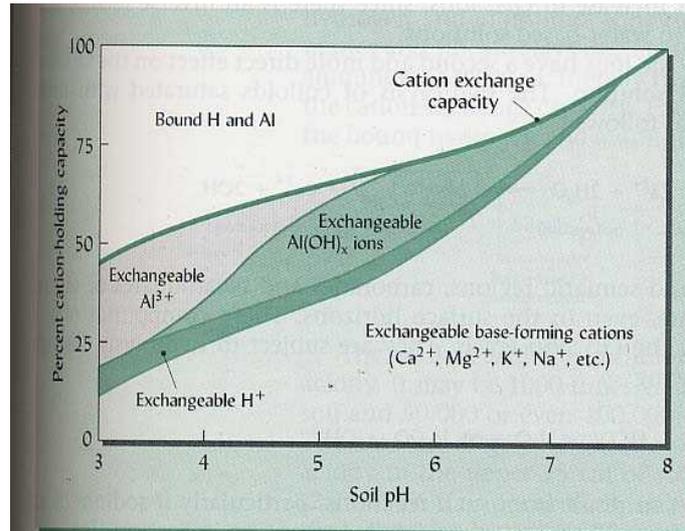


Figure : Le sol devient acide lorsque des ions H^+ ajoutés à la solution du sol échangent avec des ions non-acides Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+ (Brady et Weil, 2008).

Seules une partie des charges chez les argiles peuvent ainsi être variables selon le pH alors que pour la matière organique, quasiment toutes les charges peuvent ainsi varier avec le pH.

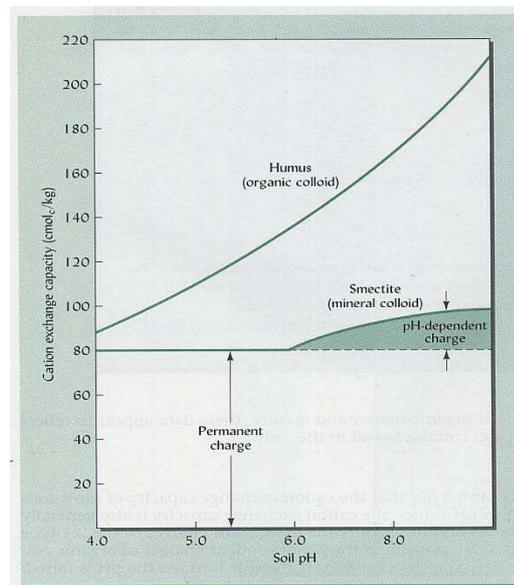
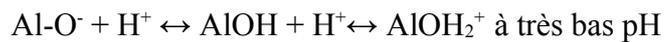


Pour les MO :

-les charges variables correspondent à des sites carboxyliques :



- pour les argiles, il s'agit de sites de bordure des feuillets :



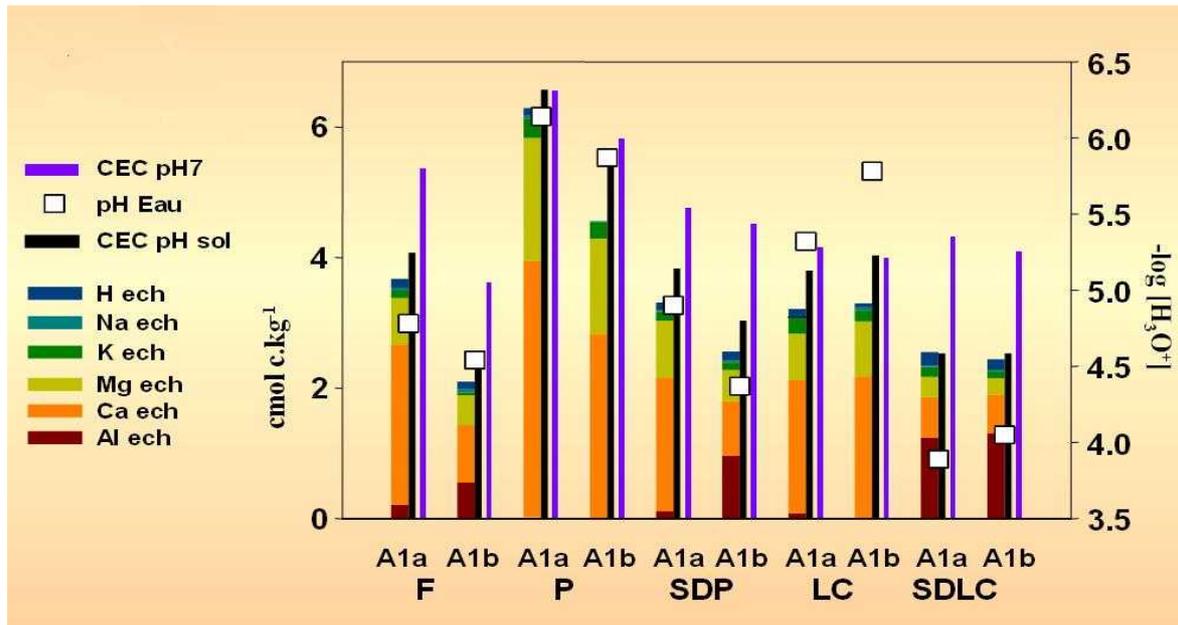
2.5 Analyse

Nous avons décrit brièvement comment se fait la détermination d'une CEC au labo. On peut mesurer, par analyse, pour un échantillon de sol donné, la CEC, 'la taille' du réservoir donc, exprimée en meq/100g sol.

Mais il est important de noter que 2 types d'analyses existent :

- ◆ à pH7 (CEC Metson), ce qui représente une CEC potentielle si le sol est ramené à pH7
- ◆ au pH du sol : (CEC cobaltihexamine) : c'est la CEC du sol compte tenu de son niveau d'acidité actuel

Voici une représentation de différents états chimiques de sols brésiliens avec différents usage (F: forêt, P :Prairie, SD : semis direct, LC labour). Pour chaque sol, sont représentés les pH, les CEC Metson et cobaltihexamamine, et la 'garniture en cations'. Qu'observe-t-on?



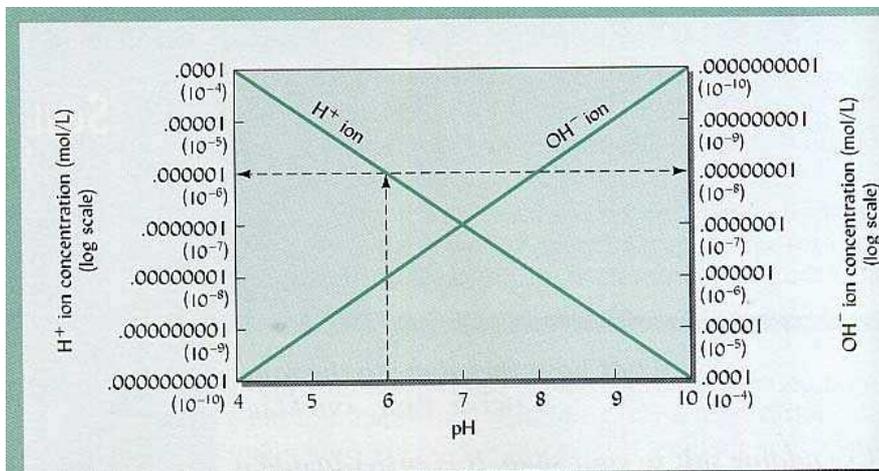
3. L'ion hydrogène (H⁺) et le pH

3.1 définition

Le pH est défini comme le logarithme décimal de la concentration d'une solution en ions H⁺.

$$\text{pH} = -\log_{10} [\text{H}^+]$$

La constante d'équilibre $K_{\text{H}_2\text{O}} = [\text{H}^+] [\text{OH}^-] = 10^{-14}$

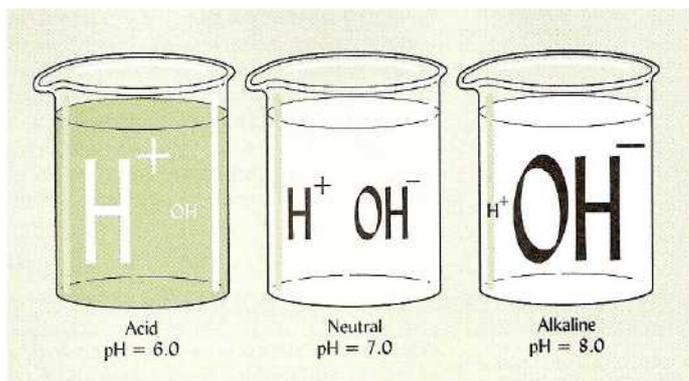


Donc le pH varie entre 0 et 14 et le pH = 7 lorsque [H⁺] = [OH⁻]

	VALEUR DU pH	STATUT ACIDO-BASIQUE
	pH ≤ 5,5	Sol très acide
	5,5 < pH ≤ 6,0	Sol acide
	6,0 < pH ≤ 6,5	Sol peu acide
	6,5 < pH ≤ 7,0	Sol neutre
	7,0 < pH ≤ 7,5	Sol peu alcalin (peu basique)
	pH > 7,5	Sol alcalin (basique)

L'ion H⁺ occupe donc une place importante dans la catégorie des ions échangeables puisqu'il détermine le pH des sols. C'est la propriété chimique du sol qui est la plus mesurée à l'heure actuelle. Le pH des sols

acides se situe généralement entre 4 et 7 tandis que le pH des sols alcalins se situe habituellement entre 7 et 10.



3.2 mesure et détermination du pH

3.2.1 Mesure

La mesure du pH du sol est une mesure empirique au cours de laquelle on mélange habituellement un volume de sol avec un volume d'eau. On insère ensuite des électrodes dans cette suspension. Lorsque les électrodes sont plongées dans les suspensions du sol, l'électrode de pH engendre par rapport à l'électrode de référence une différence de potentiel en fonction de l'activité de l'ion hydrogène en solution. Il faut noter que les électrodes de pH mesurent l'activité de l'ion en solution plutôt que la concentration de cet ion.

(L'activité d'un ion en solution est une mesure de sa réactivité. Dans les solutions diluées, l'activité de l'ion est à peu près égale à sa concentration.)

3.2.2 Groupes d'acidité et différentes déterminations du pH

Il existe 3 groupes principaux d'acidité dans les sols. Ces 3 types d'acidité s'additionnent pour donner l'**acidité totale** du sol.:

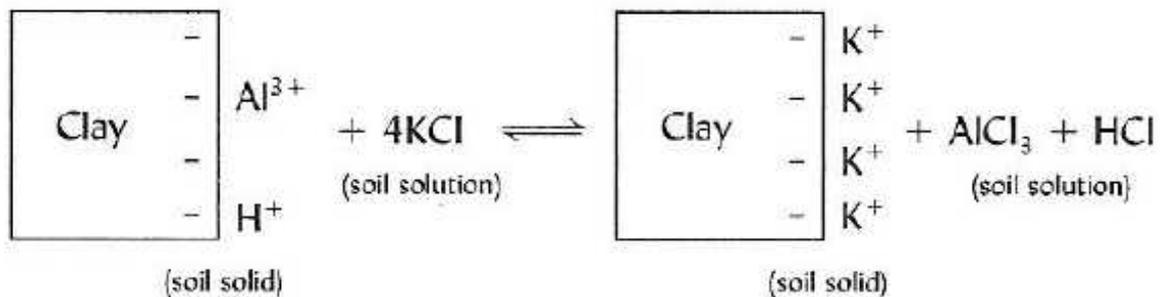
3.2.2.1 l'acidité active

Elle est due aux ions H^+ dans la solution du sol ; elle est mesurée par le pH eau, grâce à un pH mètre. Ce dépôt d'acidité est très petit comparativement aux dépôts d'acidité échangeable et d'acidité résiduelle. Cette acidité est toutefois très importante puisqu'elle détermine la solubilité de plusieurs éléments et fournit le milieu de solution du sol dans lequel les racines des végétaux et les microorganismes sont exposés.

3.2.2.2 l'acidité échangeable

Elle est due à l'aluminium et l'hydrogène adsorbés sur le complexe, facilement échangeables par d'autres cations, comme avec K^+ dans une solution de KCl.

Le pH KCl permet donc de mesurer l'acidité d'échange. Le sol est mélangé non pas à de l'eau mais à une solution de KCl. L'acidité échangeable est d'abord associée avec les ions d'aluminium et d'hydrogène échangeables qui sont présents en grande quantité dans des sols très acides (Voir figure suivante). Ces ions peuvent être libérés dans la solution du sol par l'échange de cations avec un sel non saturé, comme le KCl, selon l'équation suivante :



L

Le KCl a donc pour effet de chasser les H^+ et Al^{3+} fixés sur le complexe d'échange, ce qui permet de déterminer l'acidité **échangeable** du sol.

Le pH KCl est toujours inférieur au pH eau, l'écart entre les 2 varie de 0,2 à 1,5 :

Ecart $< 0,5$: acidité échangeable faible

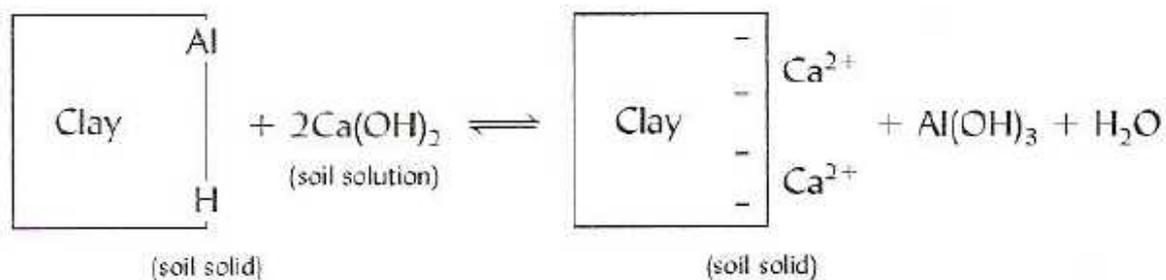
$0,6 < \text{Ecart} < 1$: acidité échangeable moyenne

Ecart > 1 : acidité échangeable élevée

3.2.2.3 l'acidité résiduelle

Elle peut être neutralisée par de la chaux ou autres matériaux alcalins, mais elle ne peut être détectée par la technique du sel remplaçable, comme on l'a vu avec Kcl.

L'acidité résiduelle est généralement associée avec les ions aluminium et hydrogène (incluant les ions hydroxydes d'aluminium) qui sont liés dans des formes non-échangeables par la matière organique et les argiles (liés par covalence) Lorsque le pH augmente, l'hydrogène lié se dissocie et les ions d'aluminium liés sont libérés et précipitent dans la forme amorphe $\text{Al}(\text{OH})_3$. Ces changements libèrent alors des sites d'échange de cations négatifs et augmente la capacité d'échange cationique. La réaction avec un matériau chaulant (ex. $\text{Ca}(\text{OH})_2$) montre que l'hydrogène et l'aluminium peuvent être libérés :



L'acidité résiduelle est généralement de beaucoup supérieure à l'acidité active ou l'acidité échangeable. Elle peut être 1000 fois supérieure dans un sol sablonneux, et 50,000 à 100,000 fois supérieure dans un sol argileux riche en matière organique. La quantité de chaux recommandée pour au moins partiellement neutraliser l'acidité résiduelle dans les 15cm supérieurs du sol est communément de 5 à 10 TM / ha.

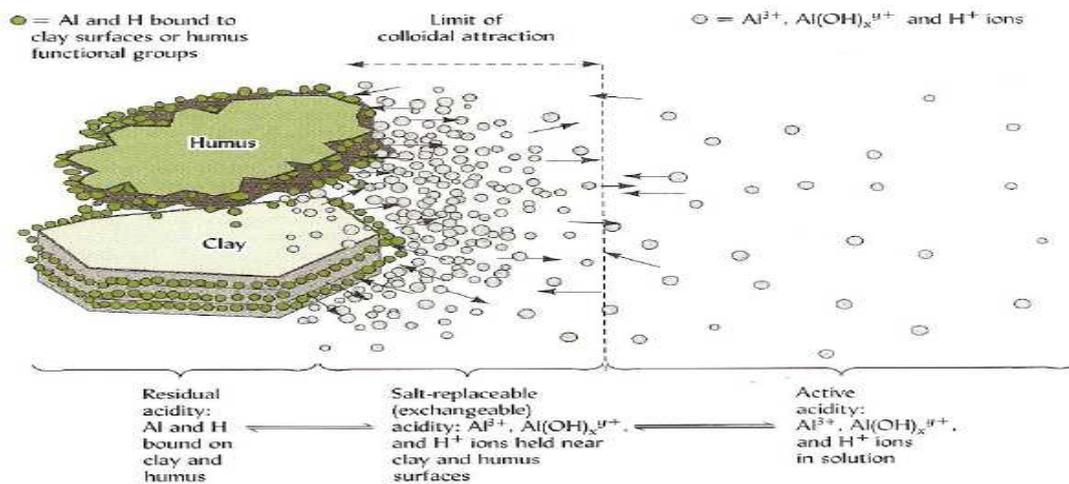


Figure : Relation d'équilibre entre les acidités résiduelles, échangeables, et active dans un sol avec des colloïdes organiques et minéraux (Brady et Weil, 2008).

3.3 Gammes de pH des sols

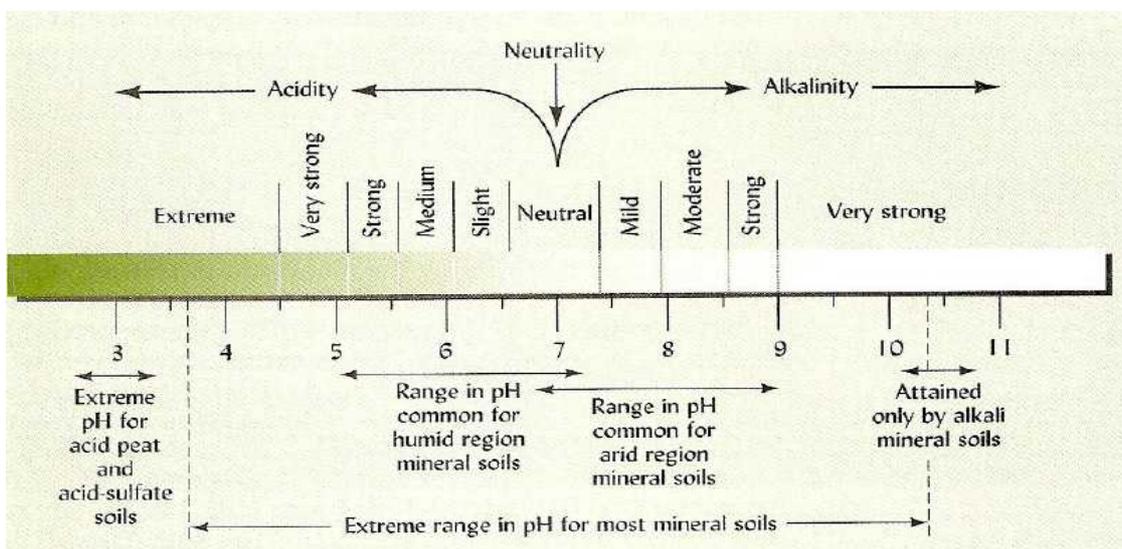
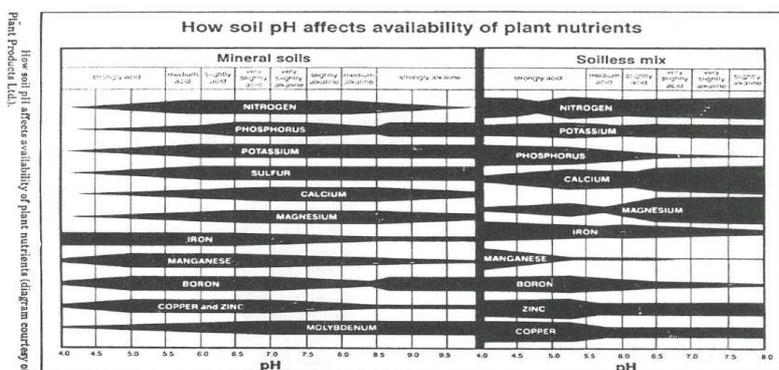


Figure : Gammes de pH extrêmes pour la plupart des sols minéraux et gammes dans les régions humides et régions arides des sols (Brady et Weil, 2008).

3.4 Les informations que donnent le pH



Le pH est une indication du niveau général du sol en éléments chimiques assimilables). Le pH du sol se

trouve en relation directe avec les cations et les anions échangeables.

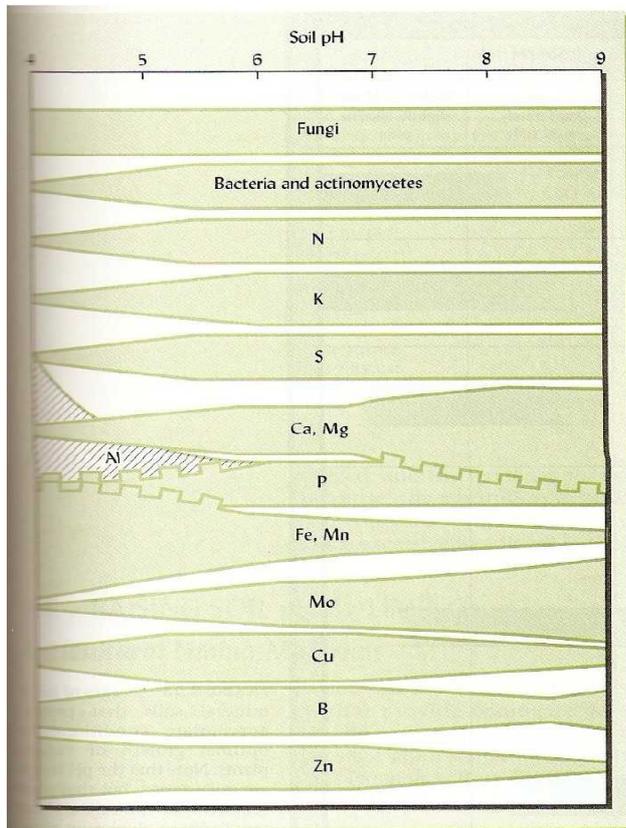
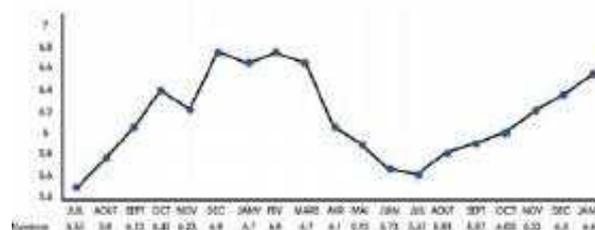


Figure : Relations existant dans les sols minéraux entre le pH et la disponibilité des éléments nutritifs pour les végétaux (Brady et Weil, 2008).

3.4 Facteurs qui affectent la détermination du pH des sols

- ◆ 1- La dilution du sol entraîne une hausse légère de la valeur du pH. Cet effet est particulièrement prononcé quand on utilise de l'eau ou du KCl.
- ◆ 2- Les variations saisonnières sont causées par les fluctuations de la concentration de l'acide carbonique et celles des sels solubles dans la solution du sol. Le pH du sol est généralement plus bas durant les périodes sèches et chaudes, et il est plus élevé durant les périodes pluvieuses et froides.



(Source : étude MEAC sur 3 zones de prélèvements repérées dans un limon léger de 7,5 meq/100 g de CEC, 1994-1995-1996)

3.5 Acidification des sols et correction par les amendements basiques : aspects théoriques

3.5.1 Amendements basiques et intérêts de leur utilisation pour la correction du pH

série de diapos CELAC

3.5.2, besoin en chaux et chaulage

Pour des terres agricoles nécessitant un chaulage, il faut en premier évaluer le besoin en chaux avant de choisir l'amendement et réaliser l'épandage.

On distingue les **chaulages de redressement**, quand il faut remonter de manière importante le pH d'un sol et les **chaulages d'entretiens**, réguliers, qui visent à stabiliser le niveau de pH atteint par des apports réguliers.

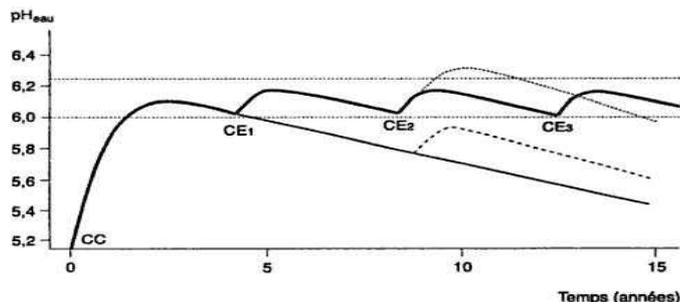


Fig. 1 – Évolution du pH de l'horizon de surface d'une parcelle de grande culture (d'après Bussi eres, 1978 ; Coppenet, 1980).

La courbe en trait gras continu repr esente a) l'augmentation brutale du pH cons ecutive à un chaulage important dit de correction (CC) ; b) les oscillations ult eries au sein de la plage de pH 6,0 à 6,25 jug ee optimale dans le contexte breton étudié par les auteurs et qui sont dues à trois chaulages d'entretien (CE1, CE2 et CE3) régulièrement espacées dans le temps. La portion de droite en trait continu matérialise ce que serait l'évolution du pH en l'absence de ces derniers. Les courbes en trait fin discontinu correspondent à des opérations réalisées soit trop tard et à dose insuffisante, soit trop tôt et à dose trop importante, entraînant une inadaptation temporaire du pH par défaut ou par excès.

3.5.2.2 Chaulage de redressement

Pour les **chaulages de redressement**, la méthode française est de calculer le besoin en chaux (BEC) :

Le besoin en chaux d'un sol se définit comme la quantité de chaux (CaO) nécessaire dans l'horizon de labour pour élever le pH au niveau désiré. Un pH cible est généralement utilisé pour optimiser le rendement d'une récolte : nous avons vu que la valeur de 6,5 est un bon pH cible vis à vis de la biologie du sol et surtout de la disponibilité en éléments nutritifs..

Quel raisonnement peut-on faire compte tenu des variations saisonnières ?

Si l'on mesure un pH en hiver : mettons que l'on ait un pH eau de 6,4.

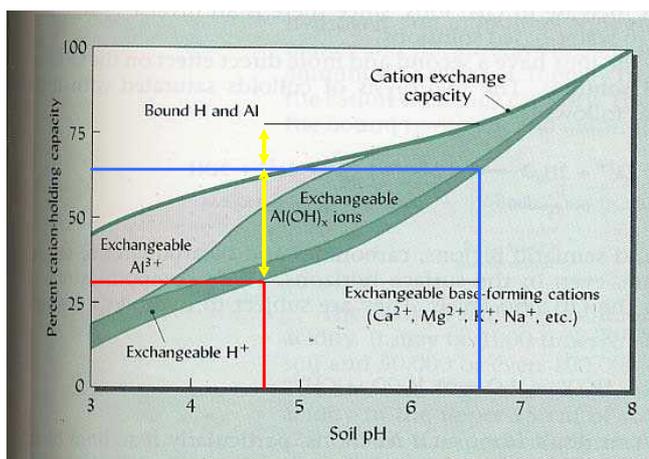
Il se peut fortement qu'en printemps/été, en pleine période de croissance végétale on obtienne 1 point de moins en pH, soit 5,4.

Donc pour rester dans une gamme de pH optimal pour la croissance des plantes il serait bon dans ce cas de monter d'un point le pH du sol.

A partir de ce pH souhaité, pour le calcul du besoin en chaux :

–soit il y a des références locales, des études permettant de lier un pH souhaitable à un niveau de saturation souhaité ( tude réalisée sur des échantillons de sol)

–soit on vise un niveau de saturation satisfaisant



Exercice (20 minutes) : Calcul d'un besoin en chaux

Remarque : dans cette approche, on utilise une courbe représentative du type de sol pour lequel on veut redresser le pH. Il s'agit donc d'un modèle, avec quelques sources possibles d'erreurs.

Pour éviter ce problème, il est plus précis de relaiser un essai sur échantillon réel de sol sur lequel on effectue des apports croissants d'un produit neutralisant en suivant l'augmentation du pH ; puis on extrapole les résultats du laboratoire à la parcelle.

Dans de nombreux pays (Etats unis, Canada, Brésil, Argentine), la méthode utilisée pour la recommandation de chaulage est celle du pH SMP ou indice SMP (Siqueira et al., 1987). D'abord on détermine le pH en eau (acidité active) et ensuite on ajoute la solution SMP tamponnée à pH 7,5 (qui va mesurer l'acidité potentielle).

Cette acidité potentielle est la capacité du sol à fournir des ions H^+ à la solution (soit la somme de l'acidité d'échange et de l'acidité résiduelle que l'on a défini au préalable). Dans des sols acides ($pH < 5,5$), les H^+ sont liés aux constituants par les sites ($-COOH$ et $-OH$ de la matière organique; $Si-OH_2$, $Al-OH_2$ et $Si-OH$, $Al-OH$ des argiles et des Oxy-hydroxydes de Fer et d'Aluminium). L'ion Al^{3+} est le principal trait marquant de l'acidification des sols tropicaux, ainsi que pour la toxicité aux plantes.

On utilise donc la solution basique SMP (Shoemaker et al., 1961) qui est tamponnée à pH 7,5, donc capable de dissocier les ions H^+ des sites d'échange et d'arracher les ions Al^{3+} . La procédure consiste à ajouter 6 ml de la solution SMP à la solution sur laquelle on a mesuré le pH eau, dans une proportion de 1:1:0,5 (sol: eau: SMP). Puis, on mesure à nouveau le pH pour obtenir le pH SMP. La recommandation d'amendement calcaire est établie à partir d'un abaque qui met en relation le pH SMP et le pH (eau) désiré. L'abaque est composé des données extraites des essais régionaux sur plusieurs types de sol. Les résultats sont exprimés en tonnes de $CaCO_3$ par hectare à 100% de PRNT (Pouvoir Relatif de Neutralisation Total).

3.5.2.3 Chaulage d'entretien

Pour évaluer des chaulages d'entretien, le principe est d'évaluer les entrées et les sorties de CaO du sol par un bilan calcique. Si le bilan est déficitaire sur la rotation, il faut alors les compenser par des apports de chaulages d'entretien.

Rmq : des modèles de bilans de flux de protons existent et permettent de baser les apports d'entretiens non pas sur le bilan calcique mais sur un bilan d'acidité.

4 Cycle, états et disponibilité des différents éléments nutritifs

Chacun des éléments nécessaires aux plantes est présent dans le sol, où l'une de ses formes est assimilable par les plantes (sauf le carbone, assimilé par les parties aériennes).

Il est donc intéressant de comprendre les différentes formes de chaque éléments dans le sol, et à un niveau plus global, comprendre en quoi le sol n'est qu'un compartiment dans le cycle de l'élément.

4.1 L'Azote (N)

4.1.1 Différentes formes de l'azote

L'azote est présent dans la nature sous deux états :

- à l'état libre, N_2 , où il constitue près de 80 % de l'air que nous respirons,
 - à l'état combiné, sous forme minérale ou organique :
- minérale (gaz) : N_2O (protoxyde d'azote), NO (monoxyde d'azote), NO_2 (dioxyde d'azote) -

NH₃(ammoniac).

- minérale (ions) : NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻
- organique : urée, NH₂CONH₂ acide aminé

4.1.2 Quantités dans le sol et analyse

En agronomie, on exprime toujours les quantités d'azote en kilos de N. Un kilo par hectare (Kg/Ha) est appelé l'unité.

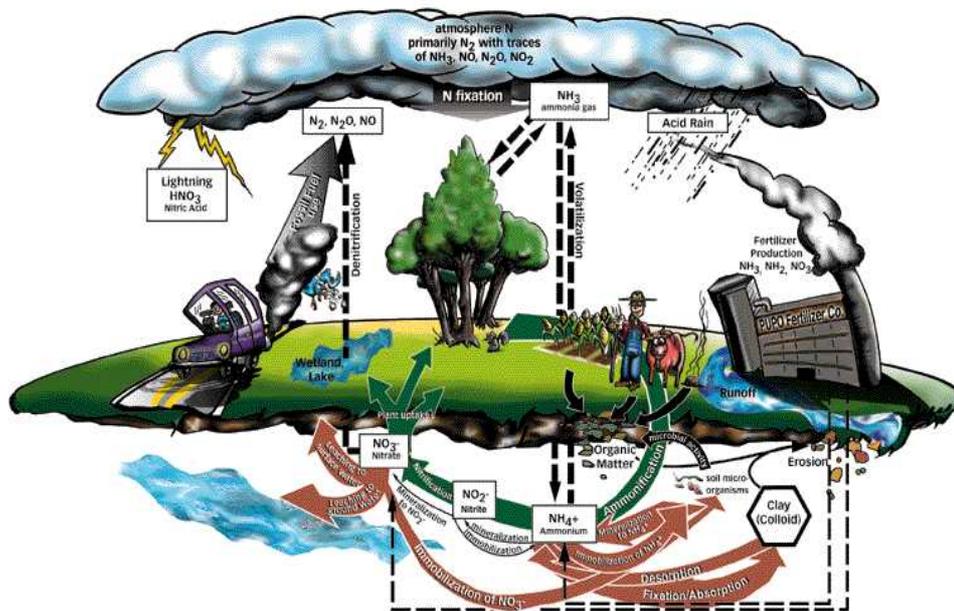
Selon le taux d'humus, il peut y avoir **sous forme organique** entre 1000 et 7000 unités d'azote (N) dans le sol. (ex calcul)

Par contre les **formes minérales** de l'azote représentent souvent entre 10 et 50 unité d'azote dans le sol, soit très peu. Après un apport d'engrais minéral, ces quantités peuvent atteindre 150, 200 unités d'azote.

On peut faire une analyse de l'azote total d'un échantillon de sol (Methode kjejdhal). Cette analyse ne présente pas grand intérêt car elle n'est pas utilisable en soi pour des modèles de prédiction pour la fertilisation. Par contre, quantifier la part de l'azote minéral du sol est une analyse très utilisée pour faire ce que l'on appelle les reliquats azotés : ils permettent de savoir combien d'azote minéral contient un sol avant le développement d'une culture.

4.1.3 Cycle de l'azote

Les réserves azotées du sol se trouvent essentiellement à l'état organique sous forme d'humus qui contient environ 5% d'azote (une très faible partie de l'azote est stockée sous forme échangeable sur le complexe, NH₄⁺).



Chaque année, sous climat tempéré ; 1 à 2% des réserves d'azote organiques humifiées passent à l'état minéral disponible pour la plante : c'est la **minéralisation** (que l'on exprime par un coefficient de minéralisation annuelle ou K₂), qui intervient quand la température du sol est suffisamment élevée. Cette minéralisation est une suite de réaction faisant passer l'azote organique vers des formes minérales : **ammonification, nitrification**.

Les plantes absorbent exclusivement l'azote minéral du sol. Seules les cultures légumineuses ont la faculté de fixer l'azote gazeux par leurs nodosités (fixation symbiotique). L'azote joue un rôle essentiel dans la synthèse de la matière vivante à partir de la matière minérale.

L'homme et les animaux ne peuvent absorber directement ni l'azote de l'air, ni l'azote minéral.

Ce sont les végétaux qui leur fournissent sous forme organique l'azote dont ils ont besoin. La plus grande partie de l'azote, ingérée par la vache retourne au sol par ses déjections.

La **dénitrification** constitue une autre source de perte d'azote dans l'atmosphère. Elle est provoquée par des microorganismes du sol qui réduisent l'azote minéral en différents oxydes d'azote, et en azote gazeux. Une autre perte d'azote possible sous forme gazeuse est la **volatilisation** de l'ammoniaque NH₃

La **lixiviation** des nitrates constitue une source de perte d'azote vers les eaux souterraines. Il est provoqué par le drainage naturel, car l'ion nitrates a une grande affinité pour l'eau, très soluble donc (l'ammonium est aussi lixiviable).

Par rapport à un écosystème naturel, une parcelle cultivée a ceci de particulier : les pertes d'azote par lixiviation, par dénitrification sont plus importantes et les récoltes représentent un flux sortant important.

Pour équilibrer ces pertes, il y a des **fournitures d'azotes** particulières dans la parcelle cultivée Quelles sont-elles ?

-**amendements organiques** (effluents d'élevage notamment). Dans ce cas, La volatilisation de l'ammoniac dans l'air représente une perte d'azote allant de 10 à 90% de l'azote minéral contenu dans les effluents d'élevage (fumiers, lisiers).

La valeur fertilisante des principaux effluents

	AZOTE				P ₂ O ₅		K ₂ O		MgO	CaO	
	Teneur	Coef d'efficacité			Teneur	Coef d'efficacité	Valeur	Teneur	Teneur	Teneur	
	kg/t	Cultures d'hiver	Cultures printanières	Présoles	kg/t	cha	kg/t	kg/t	kg/t	kg/t	
FUMIER	Bovins / stabulation	5,8	0,15	0,30	0,15	2,3	1,00	2,3	9,6	1,9	3,8
	Ovins	6,7	0,15	0,30	0,20	4,0	1,00	2,3	12,0	2,5	11,2
	Porcins	7,2	0,20	0,30	0,40	7,0	1,00	2,3	10,2	2,5	6,0
	Caprins	6,1	0,15	0,15	0,20	5,2	1,00	2,3	7,0	2,0	8,0
	Chevaux	8,2	0,15	0,15	0,20	3,2	1,00	2,3	9,0	2,0	6,0
	Poulets de chair	29,0	0,40	0,40	0,50	25,0	0,65	2,3	20,0	4,7	24,0
LISIER	Bovins (dilué)	2,7	0,40	0,50	0,50	1,1	0,85	2,3	3,3	0,5	2,5
	Porcins (fosse ext.)	4,9	0,50	0,60	0,60	3,8	0,85	2,3	2,6	0,8	3,6
	Canard (10 à 15 % MS)	5,9	0,50	0,60	0,60	5,9	0,85	2,3	4,1	1,9	3,4
FUMES	Poules pondeuses (25 % MS)	15,0	0,60	0,60	0,60	14,0	0,65	2,3	12,0	2,3	40,0
	Poules pondeuses (80 % MS)	40,0	0,60	0,60	0,60	40,0	0,65	2,3	28,0	7,7	120,0
DIVERS	Vinasses concentrées (80 % MS)	25,0	0,50	0,50	0,50	2,0	1,00	2,3	70,0	0,7	20,0
	Vinasses diluées	2,5	0,50	0,50	0,50	0,2	1,00	2,3	7,0	0,1	2,0
	Boues urbaines liquides	3	0,20	0,20	0,40	2,5	0,80	2,3	0,9	0,5	1,0
	Boues urbaines pâteuses (18-22 % MS)	10	0,30	0,30	0,30	7,5	0,70	2,3	0,8	1,5	5,0
	Boues urbaines chaulées (25-40 % MS)	7,5	0,30	0,30	0,30	8	0,70	2,3	1	1,5	100,0
	Boues urbaines séchées (90-95 % MS)	40	0,10	0,10	0,20	60	0,25	2,3	5	5	20,0
	Compost urbain	10	0,10	0,10	0,10	4,2	0,10	2,3	12,6	2,8	2,0
Écumes de défécation	2,0	0,40	0,40	0,40	10,0	0,50	2,3	1,5	11,0	300,0	

Valeurs fertilisantes moyennes des principaux effluents d'élevage, effluents urbains et industriels, en kg/tonne de produit brut et coefficients d'efficacité (ou équivalence engrais). Source : synthèse ANVALIS, Institut de l'élevage.

-**Fixation symbiotique** via les légumineuses, cultures ou couverts. La présence de légumineuses dans la rotation représente une entrée d'azote pour la culture elle même et aussi pour la suivante par minéralisation. Quelles cultures ? (Pois, Luzerne, Soja, Lupin, Féverole...). L'introduction de couverts entre 2 cultures est aussi un moyen de fixer de l'azote au champ, qui sera disponible pour la culture suivante. Quelles espèces ? (Vesce, Gesse, Mélilot, Trèfles...)

-**Apports d'engrais azotés** : urée CO(NH₂)₂, ammonium, nitrates ; ces engrais azotés fournissent de l'azote sous des formes non stockables, facilement lixiviables et donc doivent être employés en agriculture par un couplage le plus précis possible entre besoins et fournitures.

- Remarque : les roches ne contiennent pas d'azote...et donc n'en libèrent pas par altération ...

4.1.4 Rôle de l'azote chez la plante, symptômes de carence

L'azote entre, avec d'autres éléments (carbone, oxygène, hydrogène...), dans la composition des acides aminés formant les protéines. L'azote est un élément essentiel pour la constitution des cellules et la photosynthèse (chlorophylle). C'est le principal facteur de croissance des plantes et un facteur de qualité qui influe sur le taux de protéines des végétaux.



Carence en N sur colza (VEGEDIAG Expert)

Blé avec et sans carence (VEGEDIAG Expert)

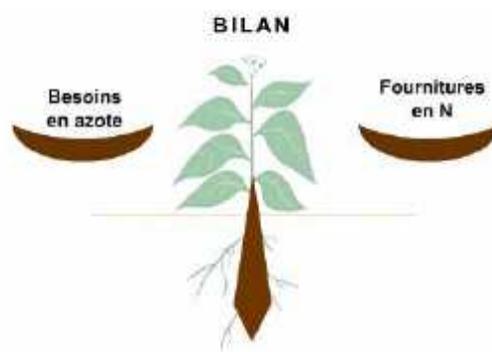
Carence en N sur maïs (VEGEDIAG Expert)

4.1.5 Bases pour le raisonnement de la fertilisation ('fumure') azotée

4.1.5.1 Notion de bilan prévisionnel

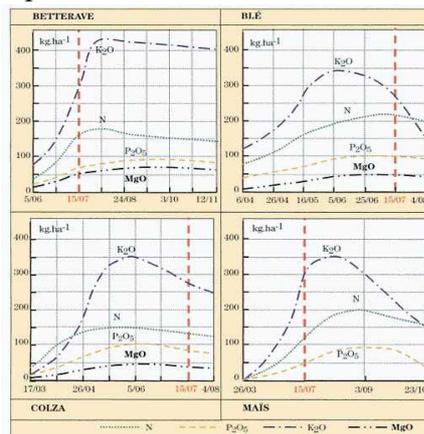
Nous avons vu que les formes de l'azote absorbables par la plante sont très solubles et très lixiviables ; ces formes ne sont donc pas 'stockables' dans le sol. En effet, on ne peut envisager de faire des apports massifs d'engrais azotés correspondant aux besoins d'une succession de cultures.

On va donc réfléchir par culture, sur une approche d'un bilan prévisionnel, que l'on fait avant ou en début de cycle de la culture :



A travers ce bilan, on se propose d'estimer d'un côté l'ensemble des fournitures d'azote disponible pour la plante (minéralisation primaire et secondaire de différentes sources organiques, azote minéral déjà présent dans le sol, engrais) et de l'autre côté les besoins (besoins de la plante, mais aussi le reste d'azote en fin de cycle de la culture).

Si, dans la pratique, on arrive pour une culture à ce que ce bilan soit équilibré, et que les quantités d'azote soient disponibles lors des pics de besoins du cycle de la plante, la nutrition azotée sera optimale et l'azote ne sera pas le facteur limitant du rendement.



4.1.5.2 Estimation du bilan, modèle statique forfaitaire

Pour réaliser un bilan 'azote' prévisionnel, pour une culture donnée, on peut tenter d'estimer les différentes fournitures d'azote et les besoins.

Quels sont-ils ?

Le bilan peut alors s'écrire simplement : $Rf - Ri = (Mo + X) - (Pf - Pi + L)$

ou encore : $X = (Rf + (Pf - Pi) + L) - (Ri + Mo)$

Soit **Quantité à apportée = besoins – fournitures du sol**

(Jusqu'à présent, le bilan était réalisé sortie hiver en raison de l'impossibilité d'évaluer les gains et pertes pendant l'automne et l'hiver (minéralisation de l'azote et lixiviation))

Rf et Ri : N minéral à l'ouverture et fermeture du bilan ;

Mo : azote minéralisé à partir de différentes sources de matières organiques dans le sol, entre les dates limites du bilan, à savoir l'humus, les apports organiques, les cultures intermédiaires, le retournement de prairies,

X : dose d'azote apportée par les engrais ;

Pf et Pi : azote minéral absorbé par la culture entre l'ouverture et la fermeture du bilan ;

L : perte d'azote par lixiviation pendant la période du bilan.

L'évaluation des différents postes de ce bilan est **statique** et **forfaitaire**. De nombreux outils (logiciel AZOBIL, tableaux de valeurs estimées à partir d'expérimentations locales) ont été développés et permettent de manière simple de réaliser un bilan prévisionnel en estimant chaque poste. Nous les utiliserons dans la partie fertilisation.

4.1.5.3 Estimation du bilan, modèle statique forfaitaire

En intégrant les dernières connaissances sur les conditions de minéralisation des matières organiques et le devenir de l'engrais apporté aux cultures, un nouveau modèle, basé sur le bilan prévisionnel d'azote minéral, est plus complet. Il s'appuie sur la modélisation de la fourniture d'azote par le sol et des différentes sources organiques du bilan en fonction du contexte pédoclimatique local (type de sol, climat, analyse de sol, rotation...).

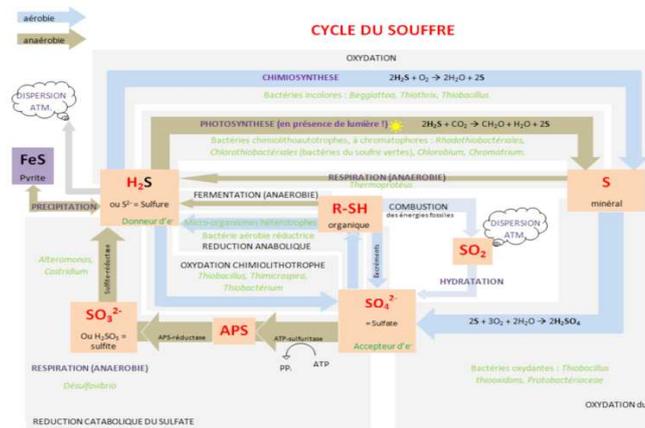
Le bilan peut alors s'écrire :



Aujourd'hui un logiciel, **Azofert**, basé sur ce modèle, intègre l'ensemble de ces 'compartiments'. Il est développé par l'INRA et est destiné aux labo d'analyses de sol pour renseigner les agriculteurs sur un bilan prévisionnel pour leurs cultures. Ce modèle intègre au maximum des données paramétrées au contexte de l'agriculteur (type de sol, données sur le sol, climat, cultures précédentes...) pour s'approcher au plus près de la réalité.

Il permet aussi de prévoir la cinétique du bilan :

soufre. Par contre dans le sol, le soufre peut provenir de l'altération de minéraux primaires (exemple : pyrite FeS_2)



Les cycles du soufre et de l'azote sont analogues tant dans les étapes de transformation que pour la spécificité ou non des micro organismes. Le passage du soufre organique aux sulfures, est l'analogie de l'ammonification et l'oxydation des sulfures en sulfates l'analogie de la nitrification.

Le cycle principale du soufre comporte deux possibilités subsidiaires :

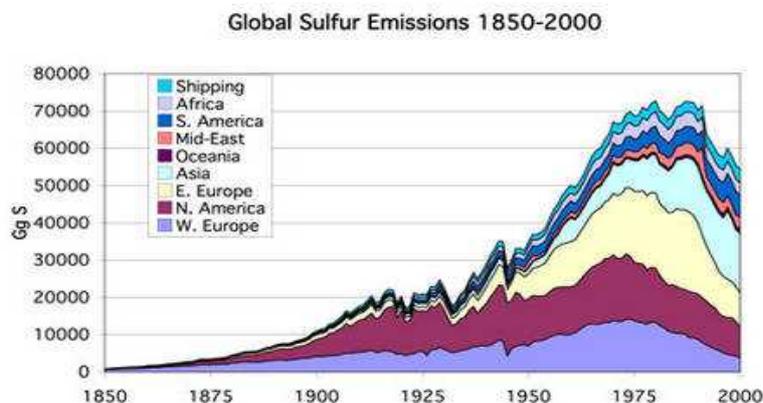
- la réduction directe des sulfates en sulfures sans passer par les composés organiques : la sulfatoréduction
- la réduction directe du soufre en sulfure

Lorsque les formes gazeuses (H_2S et SO_2) quittent le sol pour rejoindre l'atmosphère, le soufre peut revenir avec les pluies sous forme de sulfate SO_4^{2-} . L'activité industrielle est aussi fortement émettrice de sulfures et dans les pays où les fumées ne sont pas filtrées, c'est une forme d'apport de soufre non négligeable pour les sols.

Outre ces pertes (ou gains ...) par voies gazeuses, la lixiviation est important pour les sulfates, très solubles.

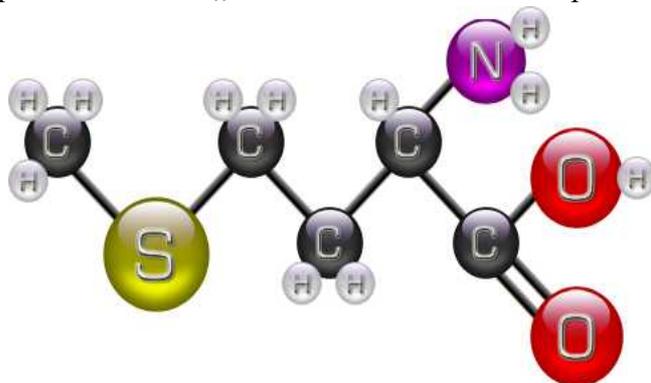
Enfin, l'amplitude de la minéralisation et de la réorganisation du soufre est plus importante que pour l'azote.

SCHEMA Michel VILAIN



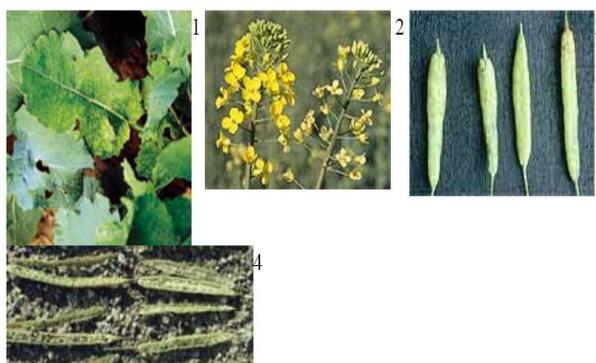
4.2.4 Rôle du soufre chez la plante, symptômes de carence

Comme pour tous les êtres vivants, le soufre est essentiel pour les végétaux : il joue un rôle de régulation osmotique mais surtout, car il entre dans la composition de plusieurs acides aminés



(Méthionine, qui est un des 8 AA essentiels pour l'homme, cystéine) et par conséquent dans de nombreuses protéines.

Symptômes de carence, ici chez le Colza :



1. Feuilles décolorées, jaunies ([agrandir](#))

2. Fleurs pâles, avortées ([agrandir](#))

3. Siliques épaisses et vides ([agrandir](#))

4. Siliques présentant très peu de graines ([agrandir](#))

4.2.5 Bases pour le raisonnement de la fertilisation

Les besoins annuels des cultures sont assez limités sauf pour les Brassicacées, les Alliées où ils atteignent 80 kg, 40 kg pour les légumineuses. Ils sont généralement satisfaits sans apport, par la minéralisation de la matière organique en majeure partie.

Dans certains sols à faible teneur organique ou sols superficiels, avec peu de terre fine, ou texture grossière, ou dans le cas où de nombreuses années de la rotation sont réalisées avec des plantes exigeantes, l'approche d'un bilan besoins-fournitures est intéressant pour raisonner la fertilisation.

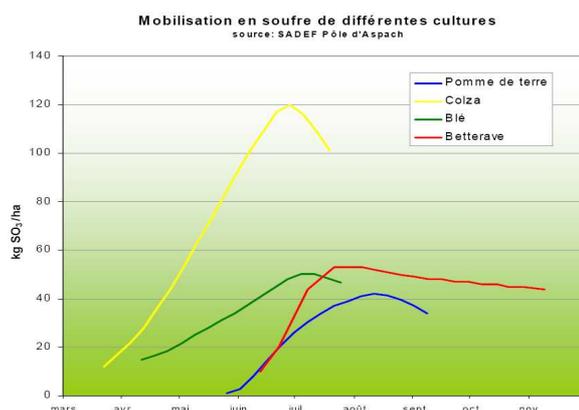
Par rapport à ce que l'on a vu sur les cycles, les **fournitures** peuvent être :

- du soufre organique sous forme d'amendements organiques (fumiers, composts, lisiers ...) alors que le soufre des engrais minéraux est sous forme sulfate, donc directement assimilable, celui des engrais de ferme n'est sous forme minérale que pour une très faible proportion. L'essentiel du soufre des déjections animales se trouve sous des formes organiques, dont la biodisponibilité l'année même est minime (minéralisation annuelle de 1 à 3% de ce soufre organique d'après des travaux danois)
- du soufre organique sous forme de résidus de cultures

- du soufre (sous forme SO_2) provenant de retombées atmosphériques du à des fumées de chaufferies ou d'industries : 14 kg SO_3 /ha/an de déposition en 1997, ce qui laisse supposer un chiffre autour de 10 à 11 kg SO_3 /ha/an)
- des engrais de synthèse sulfatés, qui peuvent apportés en même temps l'azote : sulfate d'ammoniaque, ou d'autres éléments : superphosphate simple, sulfate de potassium, gypse CaSO_4

Les besoins et pertes sont ceux de la culture et le soufre perdu par lixiviation et voie gazeuse.

- Les besoins des plantes différent fortement selon les espèces :



4.2.6 Les engrais soufrés

-Voir poly

4.3 Le phosphore

4.3.1 Différentes formes du phosphore

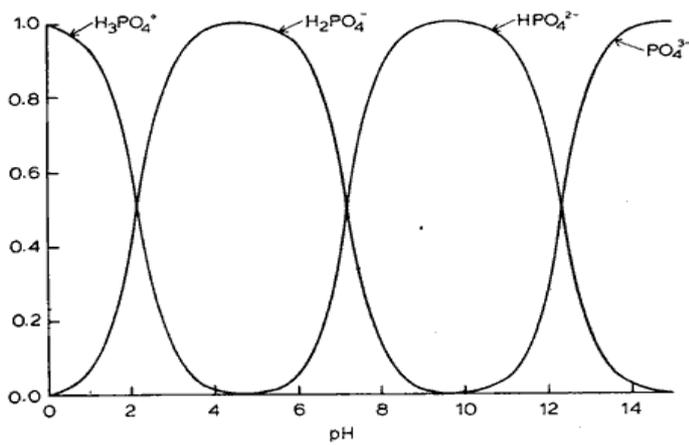
Le phosphore n'a pas de forme gazeuse. Il existe donc sous forme combinée minérale ou organique :

-organique

-minérale :

-sous la forme combinée avec du calcium, à pH élevés (phosphates calciques) ou avec l'aluminium, (phosphates d'alumine) le fer et le Mn à des pH bas.

-sous la forme d'anions dans le sol, les phosphates ; les formes d'ions présentes vont dépendre du pH. Dans la gamme 'naturelle' de pH des sols, on trouve donc le phosphore en solution sous deux formes : H_2PO_4^- , et HPO_4^{2-}

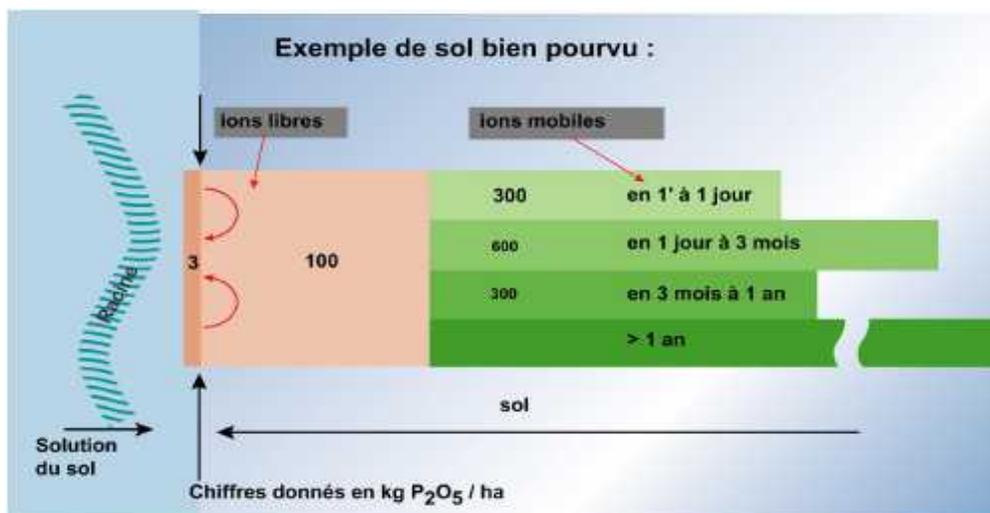


Différentes méthodes existent pour quantifier le phosphore du sol ; dernièrement, la méthode Olsen a tendance à s'imposer :

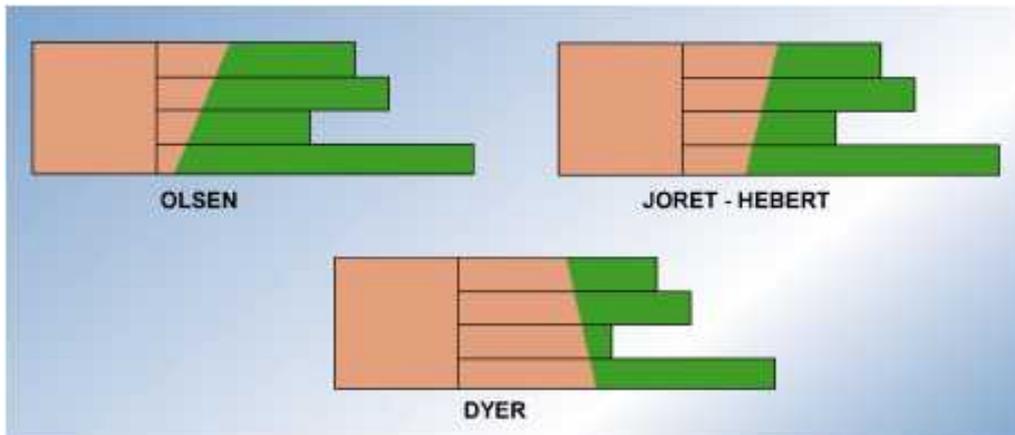
Tableau 2.1 – Les trois méthodes d'extraction du phosphore en usage dans les laboratoires d'analyse de terre français (AFNOR, 1993a, 1993b, 1995).

Méthode d'extraction Année d'origine	Réactif	Type de sol	Normes AFNOR	Normes ISO
Dyer, 1894	Acide citrique monohydraté 20 g/L	Sol non carbonaté et n'ayant pas reçu de quantités importantes de phosphates naturels	NF X31-160 juil. 1993a	non
Joret et Hébert, 1955	Oxalate d'ammonium 0,1 mol/L	Tous sols (bien que souvent limité aux sols carbonatés)	NF X31-161 juil. 1993b	non
Olsen, 1954	Bicarbonate de sodium 0,5 mol/L	Tous sols	NF ISO 11263-1 1995	

Pourquoi ? Si l'on représente les formes du phosphore par un système à compartiments (ici à 6 compartiments : en solutions, libres en rose et 4 niveaux en vert de moins en moins disponibles lorsqu'on descend...)



Voici comment chaque type d'analyse peut être représentée en fonction des compartiments de phosphore qu'elle peut extraire et donc renseigner :



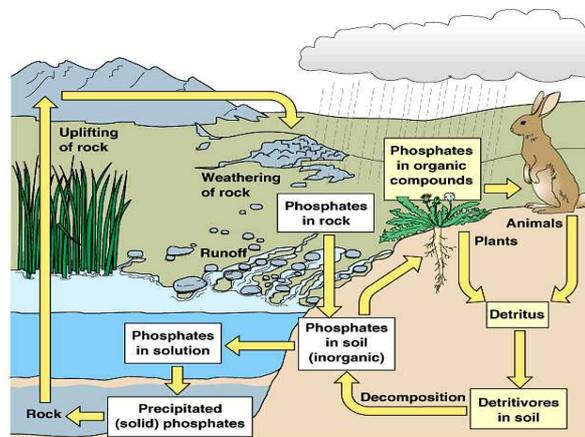
4.3.2 Quantités dans le sol

En agronomie, les quantités de phosphore sont toujours exprimées en Kg de P_2O_5 , même si cette forme du phosphore n'est pas présente dans les sols. C'est une unité de convention.

La plupart des sols renferment plusieurs tonnes de phosphore total, mais moins de 0,1% est libre dans la solution du sol, soit à peine entre 0,1 et 1,5 unité (Kg/ha) de P_2O_5 !! Dans la majorité des sols cultivés, pour avoir un ordre de grandeur, 1/3 du phosphore est sous forme organique et 2/3 sous es formes minérales.

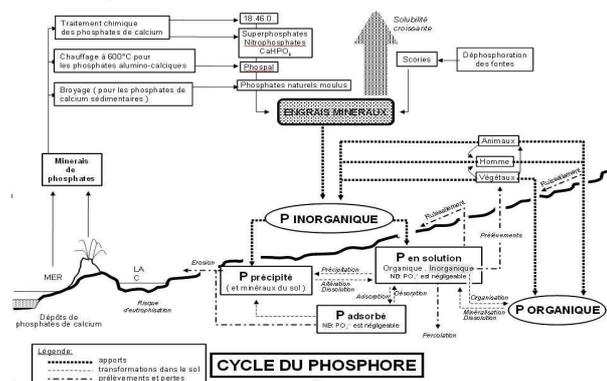
4.3.3 Cycle du phosphore

On peut décrire le cycle du phosphore à une échelle qui décrit des flux entre grands compartiments de la planète : écosystèmes marins, roches, sol et êtres vivants.



Copyright © 2003 Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

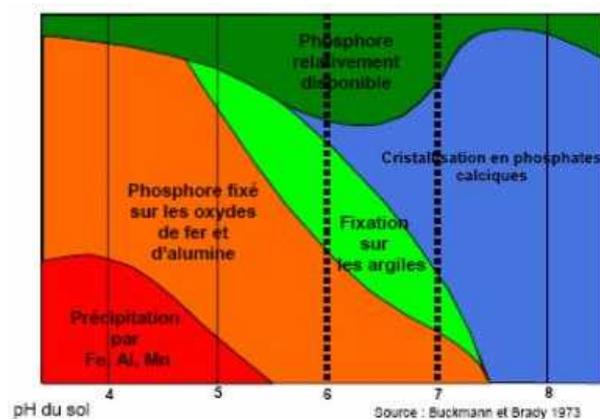
Dans le sol, on peut décrire plusieurs 'compartiments' correspondant à différents états du phosphore, plus ou moins disponibles :



-La problématique spécifique du phosphore, qui peut en faire un facteur limitant dans de nombreux systèmes de cultures, est que la forme disponible pour la plante, en solution et les formes

assez disponibles (P organique, P adsorbé) représentent peu en quantité.

Nous avons déjà vu que la proportion de ces différents états du phosphore, plus ou moins disponibles dépend notamment du pH :



4.3.4 Rôle du phosphore dans les plantes, symptômes de carence

Il joue un rôle essentiel dans de nombreuses molécules de la matière vivante.

On le trouve à l'état de sels minéraux (les phosphates) dans les tissus végétaux et animaux ou associé à des combinaisons organiques multiples, tels les acides nucléiques, les protéines du noyau, les chloroplastes.

Le phosphore est un élément génétique, énergétique et plastique de la matière vivante.

Le phosphore joue un rôle physiologique à plusieurs niveaux: il favorise la croissance de la plante, son action étant conjuguée à celle de l'azote, le développement des racines, la précocité, et la qualité des produits, la rigidité des tissus, la reproduction, la qualité des produits végétaux.

Symptômes de carence :



Symptômes de carence en phosphore (maïs)



Symptômes de carence en phosphore (tomate)

4.3.5 Bases pour le raisonnement de la fertilisation phosphatée

Nous avons déjà vu l'importance du pH pour que le phosphore du sol soit disponible pour les plantes. Pour gérer la fertilisation en phosphore, 2 approches peuvent être distinguées :

4.3.5.1 Approche par bilan entrée/sortie sur la rotation de culture

L'approche de la fertilisation en phosphore peut être réalisée sous la forme d'un bilan entrées-sorties sur une rotation. Selon cette rotation, selon les pratiques de l'agriculteur, le type de sol, on évalue l'ensemble des sorties de phosphore de la parcelle et aussi les entrées de phosphore.

Les **entrées** sont constituées par du phosphore des amendements organiques, des engrais et les **sorties** par exportations via les récoltes et de la lixiviation.

On peut réaliser ce bilan de manière simple à partir de quelques documents de valeurs (tables des teneurs des végétaux récoltés en P_2O_5 , tableau d'estimation des lixiviations selon le type de sol)

On peut réaliser aussi cela grâce à un logiciel simple : démonstration en cours (accès libre sur : http://www.unifa.fr/09_agriculteurs/calcul.htm). Mais ce modèle ne tient pas compte de la lixiviation.

Ainsi on peut se trouver dans 3 situations :

- le bilan est négatif, le système de culture mis en place est en train de 'déstocker' du phosphore du sol
- le bilan est nul : les entrées compensent les sorties ; les teneurs en phosphore du sol vont être maintenues au même niveau
- le bilan est excédentaire : les teneurs du sol en phosphore vont croître

Plusieurs cas de figure sont à envisager en croisant ces trois situations avec les teneurs en phosphore du sol :

	Bilan excédentaire	Bilan déficitaire
Teneur en Phosphore au dessus d'une valeur souhaitable*	Baisser le niveau d'apports.	Rééquilibrer le bilan
Teneur en Phosphore au dessous d'une valeur souhaitable*	Continuer pour redresser les teneurs en phosphore	Attention, modifier le système en augmentant les apports

*Il existe des tableaux pour déterminer à partir d'une valeur d'analyse, si la teneur en P_2O_5 est correcte ou non.

4.3.5.2 Approche par culture – Méthode COMIFER

Un modèle existe, développé par le COMIFER (**COM**ité **F**rançais pour une **f**ertilisation **R**aisonnée), pour déterminer la quantité de phosphore à apporter pour une culture. Il tient compte de 4 facteurs :

- ① **l'exigence de la culture** : elle est reliée à un ensemble de caractéristiques physiologiques de la culture. La quantité et la croissance des racines en est une, qui est en lien avec les niveaux d'absorption des plantes. La capacité de réaliser ou non des mycorhizes en est une autre.

Ainsi, à partir d'essais, on a pu mettre en évidence que certaines plantes réagissent très bien à des apports de phosphore croissants (plantes exigeantes), alors que d'autres réagissent très peu, comme si des teneurs faibles suffisaient à leur croissance (plantes peu exigeantes).

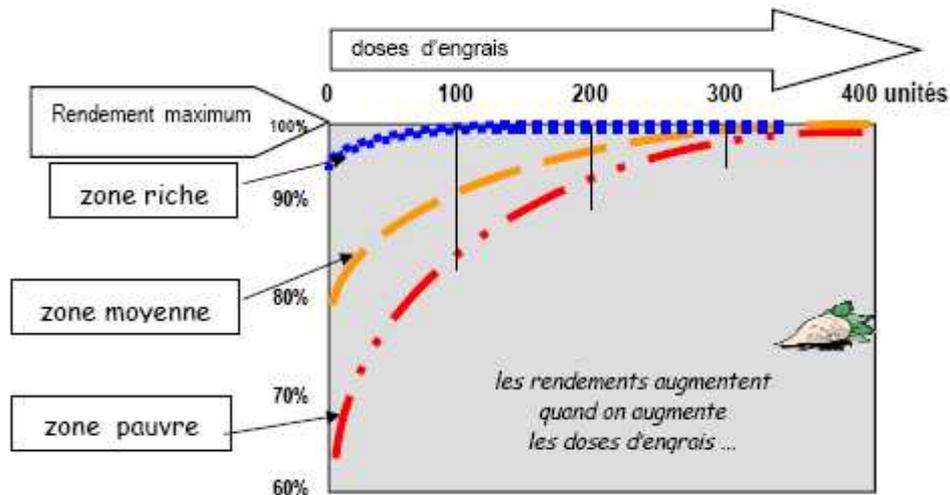


Figure 1 : Effets schématiques de doses croissantes d'engrais sur des parcelles d'essais de longue durée ayant subi trois niveaux de fertilisation différents (P0K0, P1K1, P2K2). (ITCF 1995).

-Ainsi on a pu classer les plantes cultivées selon leur niveau d'exigence en phosphore :

Exigence	Phosphore
FORTE	betterave colza luzerne pomme de terre pois conserve* oignon* - carotte*
MOYENNE	orge - escourgeon blé dur - blé de blé sorgho maïs fourrage pois protéagineux prairie temporaire féverole*
FAIBLE	maïs grain blé tendre tournesol avoine soja

-② la teneur du sol en phosphore : la quantité extraite de Phosphore à l'analyse est un indicateur du phosphore assimilable par les végétaux. Ainsi, des valeurs seuils ont été définies, régionalement : une *valeur seuil dite 'd'impasse'*, au dessus de laquelle les quantités présentes dans le sol sont telles qu'il est possible de suspendre la fertilisation. Une autre *valeur seuil dite de 'renforcement'* en dessous de laquelle, au contraire, il est nécessaire d'apporter plus de phosphore que la quantité qui sera exportée par la culture.

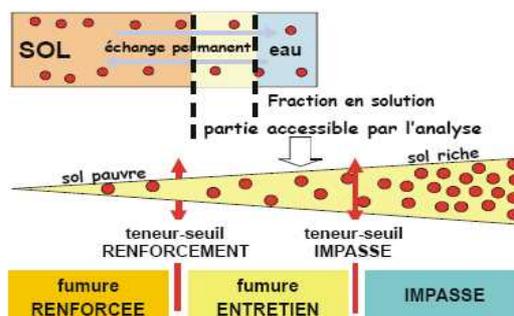


Figure 3 : Trois types de stratégies de fertilisation définies par l'exigence de la culture et l'interprétation de l'analyse de sol. (ITCF 1995).

Les teneurs seuils sont définies en tenant compte de la nature du sol, la dynamique du phosphore variant beaucoup selon que le sol est calcaire ou non, fortement limoneux. Elles sont interprétées en les combinant avec l'exigence de la culture : un sol considéré comme 'pauvre' pour une culture exigeante peut contenir des quantités d'éléments biodisponibles suffisantes pour une culture peu exigeante.

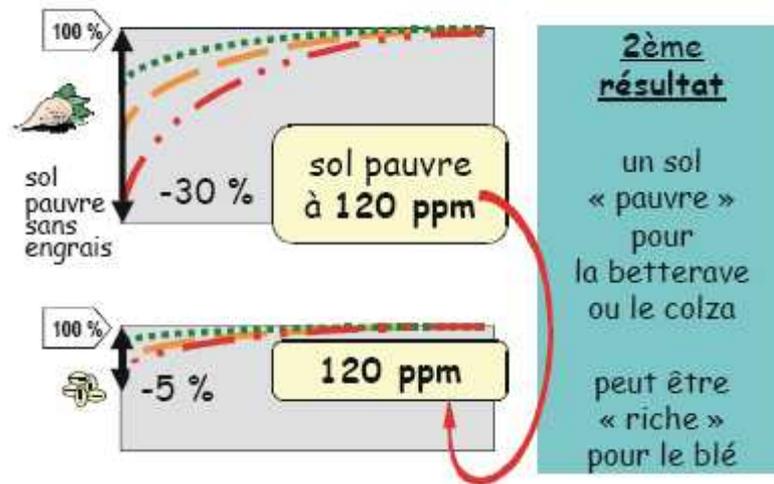


Figure 2 : L'interprétation de l'analyse de sol est liée à la classe d'exigence des cultures. (ITCF 1995).

Ainsi en croisant exigence de la plante et teneur du sol, on arrive à trois stratégies :

- *le renforcement* : cas des sols faiblement pourvus où la biodisponibilité est faible sur lequel on implante une culture d'exigence moyenne à forte. Les quantités de phosphore à apporter seront supérieures aux exportations.
- *l'entretien* : cas des sols où la biodisponibilité est intermédiaire, la préconisation est de compenser par l'apport d'engrais les exportations des cultures.
- *l'impasse* : cas des sols où la biodisponibilité est élevée et pour des cultures peu à moyennement exigeantes, il n'est pas utile d'apporter des engrais.

-③ **le devenir des résidus du précédent** : les résidus du précédent, parties aériennes et/ou racines, contiennent du phosphore qui sera disponible pour la culture suivante. Si les résidus du précédent sont exportés, la méthode propose d'augmenter la dose à apporter sur la culture suivante, mais pas si on est en situation d'impasse.

-④ **le passé récent de fertilisation** : on intègre ce dernier facteur comme indicateur d'une éventuelle évolution du phosphore vers des formes peu assimilables. On utilise le nombre d'années sans apport de phosphore : plus cette durée est longue, plus on considère que la situation est défavorable, avec des risques d'évolution vers des formes insolubles, peu disponibles du phosphore.

En croisant ① avec ② et ③ et ④ on détermine un coefficient multiplicateur avec lequel on va multiplier la quantité de Phosphore exporté par la plante pour laquelle on calcule la dose de phosphore à apporter.

Tableau 2 : grille schématique de détermination du coefficient multiplicateur des exportations. (ITCF 1995).

		Résidus du précédent	Nb d'années sans apport	Teneur du sol		
<i>exigence</i> FORTE 	exporté	2 et + 1 0	2	r	1 x E	
	enfoui	2 et + 1 0	E			1 x E
MOYENNE	exporté	2 et + 1 0	2 x E	r	1 x E	i
	enfoui	2 et + 1 0				0
 FAIBLE	exporté		1 x E			0
	enfoui				i	0

On obtient ainsi une dose d'engrais totale à apporter :

$$\text{Dose d'engrais à épandre} = \text{Rendement} * \text{Exportations} * \text{Coefficient}$$

(kg de P₂O₅ ou K₂O /ha) (Unités de rendement /ha) (kg de P₂O₅ ou K₂O /unité de rendement)

4.3.6 Les engrais phosphatés

Voici les principaux engrais phosphatés : des plus solubles (en haut) aux moins solubles :

Nom	Composition	Remarque
Superphosphates de chaux	- Normal : 18% de P ₂ O ₅ (22,5 à 30% de SO ₃ , 28 % de CaO) - Concentré : 25 à 35 % de P ₂ O ₅ (15 à 22,5 % de SO ₃) - tripe 46% de P ₂ O ₅ (17 % de CaO)	Pas d'action sur le pH
Phosphates d'ammoniaque	Engrais binaires, plusieurs teneurs : 11-48-0 10-51-0 18-46-0 18-50-0	
Phosphate bicalcique	38% de P ₂ O ₅ , 40% de CaO	
Phosphal	35% de P ₂ O ₅ , 11% de CaO	A éviter en sols acides (contient Al), recommandé en sols calcaires
Scories de déphosphoration ou scories Thomas	12 à 20% de P ₂ O ₅ , 45 à 50% de CaO 1 à 3 % MgO	Action amendante (VN 35 à 40), également riche en Fer

Phosphates naturels		25 à 35 % de P ₂ O ₅ , 30 à 55% de CaO	A réserver aux sols acides
---------------------	---	--	----------------------------

Il est important de noter que les engrais phosphatés ont une action plus ou moins rapides, en fonction de leur solubilité, et qu'ils sont utilisables pour des valeurs de pH différentes (Orange = déconseillé ; Jaune Utilisable, Vert : bien adapté) :

Type d'engrais	Très acide pH < 5	Peu acide pH 6	Neutre pH 7	Peu calcaire pH 8	Très calcaire pH 8,5	Remarques
Superphosphate et phosphate d'ammoniaque	Vert	Vert	Vert	Vert	Vert	Action très rapide
Phosphate bi calcique	Jaune	Jaune	Jaune	Vert	Jaune	Action rapide
Phosphal	Orange	Jaune	Vert	Vert	Jaune	Action lente
Scories	Jaune	Vert	Vert	Orange	Orange	Action lente Epancre Hiver
Phosphates naturels	Jaune	Vert	Orange	Orange	Orange	Action très lente Epancre Hiver

4.4 Le potassium (K₂O)

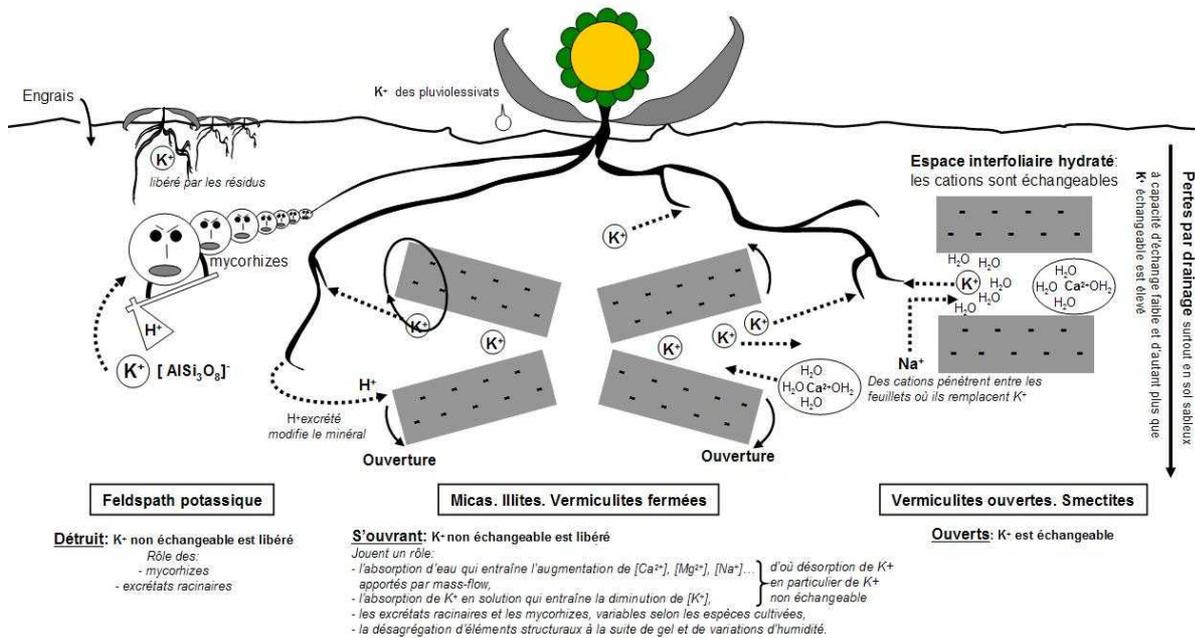
4.4.1 Différentes formes du potassium

Le potassium n'est pas lié au carbone dans la matière organique. Il reste libre sous la forme K⁺, dont une part est adsorbée par les molécules organiques. Il est donc en grande partie libéré lors de la minéralisation, sans être lui-même minéralisé.

On trouve le potassium dans le sol sous quatre formes :

- 1 en solution dans l'eau du sol.
- 2 échangeable, (adsorbé) à la surface du système d'échange : il sert à compenser les prélèvements effectués par les racines dans la solution du sol.
- 3 inclus entre les feuillets des argiles, et donc peu échangeable.
- 4 Combiné, entrant dans la constitution des minéraux primaires (ex : micas et feldspaths)

SOURCES DE POTASSIUM



Le végétal absorbe, en complément du K⁺ échangeable, du K⁺ libéré (non échangeable) jusqu'à 80-90% de la quantité absorbée. Donc, les exportations de K par les cultures n'entraînent pas de diminution équivalente de K⁺ échangeable qui peut même augmenter à la surface du sol à cause des restitutions à l'état soluble par les résidus, les pluviocessivats... de K prélevé en profondeur.
 La partie de la racine en voie d'allongement contribue très fortement à l'alimentation, notamment en provoquant l'extraction de K⁺ non échangeable des minéraux qu'elle rencontre.

Conception: A. TURPIN; N. CANCIAN, ENFA; P. CASTILLON, Arvalis Institut du végétal. Réalisation graphique R. RIVES

4.4.2 Quantités dans le sol

L'unité utilisée pour exprimer les quantités de potassium en agronomie est le K₂O, donc en Kg de K₂O/ha (ou unité de K₂O), même si, comme pour le phosphore P₂O₅, cette forme n'existe pas dans le sol.

Les quantités de potassium du sol sont souvent très importantes dans les sols, jusqu'à 30, voire 50 tonnes !

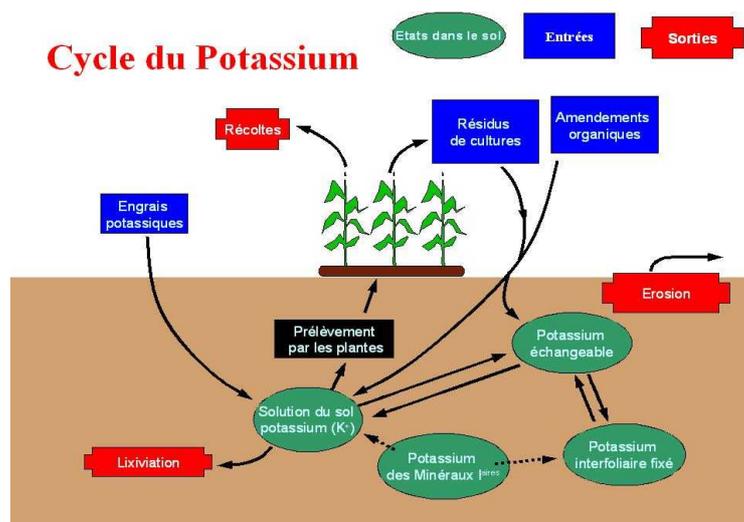
La part en solution, donc de K⁺ libre, représente entre 20 et 80 unités de K₂O, soit très peu par rapport au total.

La part adsorbée, échangeable représente quelques centaines d'unités K₂O, entre 200 et 1000.

Le reste est du K⁺ interfoliaire des argiles minéralogiques et du K⁺ constitutif des minéraux primaires.

Au laboratoire, l'analyse de sol exprime le plus souvent la part de K⁺ échangeable du sol, que l'on mesure par échange en saturant l'échantillon de sol avec NH₄⁺. Ce potassium échangeable n'est en rien le potassium disponible pour les végétaux, car on vient de le voir, les racines peuvent libérer du K⁺ interfoliaire, celui-ci pouvant représenter la majorité du K⁺ absorbé.

4.4.3 Cycle du potassium



4.4.4 Bases pour le raisonnement de la fertilisation en potasse

De m[^]me que pour le raisonnement de la fertilisation potassique, on peut avoir une approche bilan 'entrées/sorties' sur une rotaion, ou une approche par culture, seloan une approche analogue au phosphore.

4.4.4.1 Approche par bilan entrée/sortie sur la rotation de culture

L'approche est en tout point similaire :

- somme des entrées sur la rotation : engrais + amendements
- somme des sorties sur une rotation : exportations récoltes + lixiviation

4.4.4.2 Approche par culture Méthode COMIFER

La stratégie de fertilisation potassique est basée exactement sur les même 4 critères suivants :

- ① exigence en K₂O de la culture , le classement est différent de celui pour le phosphore

Exigence	Potasse
FORTE	betterave pomme de terre pois conserve* oignon* carotte*
MOYENNE	colza - luzerne tournesol maïs grain maïs fourrage pois protéagineux prairie temporaire soja - féverole*
FAIBLE	blé dur blé tendre blé de blé* orge, escourgeon avoine - sorgho

- ② Teneur en potassium échangeable de l'analyse de terre
 ③ passé récent de fertilisation sur les quatre dernières années,

④ restitution des résidus du précédent cultural.

De la même manière, le croisement de ① avec ② et ③ et ④, permet de déterminer un coefficient multiplicateur avec lequel on va multiplier la quantité de potassium exporté par la plante pour laquelle on calcule la dose de potassium à apporter.

$$\text{Dose d'engrais à épandre} = \text{Rendement} * \text{Exportations} * \text{Coefficient}$$

(kg de P₂O₅ ou K₂O /ha) (Unités de rendement /ha) (kg de P₂O₅ ou K₂O /unité de rendement)

4.4.5 Le potassium dans le plante, symptômes de carence

Le potassium est toujours abondant dans la matière sèche des végétaux. Très mobile dans la plante, il y joue un rôle multiple :

- il intervient dans l'équilibre acidobasiques des cellules et régularise la pression osmotique
- il réduit la transpiration des plantes, augmentant la résistance à la sécheresse.
- il active la photosynthèse et favorise la formation des glucides dans la feuille.
- il participe à la formation des protéines, et favorise leur migration vers les organes de réserve (tubercules et fruits).
- il contribue à renforcer les parois cellulaires, offrant aux plantes une meilleure résistance à la verse et à l'agression des maladies ou parasites.

Symptômes de carence :



Symptômes de carence en potassium (maïs)



Symptômes de carence en potassium (soja)

4.4.6 Les engrais potassiques

Nom	Teneur minimale en K ₂ O	Autres exigences
Chlorure de potassium	37% K ₂ O	Soluble dans l'eau
Chlorure de potassium contenant du magnésium	29 % K ₂ O 5% MgO	Soluble dans l'eau
Sulfate de potassium	47 % K ₂ O	Soluble dans l'eau, pas plus de 3% de chlore
 Patenkali	28 % K ₂ O 8% MgO	Soluble dans l'eau, pas plus de 3% de chlore
Nitrate de potassium	42% K ₂ O 12% N Nitrique	Soluble dans l'eau, pas plus de 1% de chlore
Extrait sde vinasse	30% K ₂ O	Soluble dans l'eau, pas plus de 1% de chlore

4.5 Le magnésium

4.4.1 Différentes formes du magnésium

Le potassium est présent dans le sol sous trois formes :

- à l'état d'ions libres, en solution : Mg^{2+}
- à l'état d'ions Mg^{2+} adsorbés sur le complexe, échangeables
- à l'état combiné, entrant dans la composition de minéraux primaires

Comme le potassium, il se trouve dans la matière organique sous forme ionique et donc libéré lors de la minéralisation sans être lui-même minéralisé.

4.4.2 Quantités dans le sol

L'unité utilisée pour exprimer les quantités de potassium en agronomie est le MgO , donc en Kg de MgO/ha (ou unité de MgO).

Les quantités de magnésium varient fortement selon les sols : il peut y avoir entre 1 tonne de MgO total jusqu'à 100 tonnes pour les sols les plus riches, comme par exemple les sols sur roches volcaniques, ou sur roche dolomitique (roche sédimentaire riche en Mg).

Mais la majeure partie (plus de 90%) de ces réserves en magnésium n'est pas échangeable et on trouve des valeurs de MgO échangeables souvent comparables à celles de K_2O , entre 300 et 800 unités de MgO .

Cependant, la concentration en ions dans la solution est généralement 3 à 5 fois plus forte qu'en K_2O et les réserves en MgO non échangeables semblent encore plus mobilisable par la plante que les réserves de potassium.

Les plantes ayant des besoins 4 à 5 fois moins importants qu'en potassium, il en ressort qu'elles ont plus de facilité à s'alimenter en magnésium.

Enfin, des facteurs d'antagonismes interviennent sur la nutrition en Mg^{2+} : la présence en trop forte quantité de K^+/Mg^{2+} , NH_4^+/Mg^{2+} et parfois Ca^{2+}/Mg^{2+} peuvent en limiter l'absorption (exemple des sols surfertilisés en potassium, ou très riches en calcaire actif)

Au laboratoire, l'analyse de sol exprime le plus souvent la part de Mg^+ échangeable du sol, que l'on mesure aussi par échange en saturant l'échantillon de sol avec NH_4^+ . Comme pour le potassium le MgO échangeable n'est en rien le magnésium disponible pour les végétaux.

4.4.3 Cycle du magnésium

Il est en tous points analogue à celui du potassium.

4.4.4 Bases pour le raisonnement de la fertilisation en magnésium

On a pour le magnésium uniquement une approche 'bilan' entrées/sorties sur la rotation de la culture :

L'approche est en tout point similaire :

- somme des entrées sur la rotation : engrais + amendements organiques + amendements basiques magnésiens éventuels
- somme des sorties sur une rotation : exportations récoltes + lixiviation

s années,

On réalise ces bilans surtout en cas de symptômes ou si des analyses de plantes révèlent des teneurs faibles en magnésium. En plus de l'approche bilan, il peut être intéressant de regarder des ratios Ca/Mg, K/Mg.

Donc dans 2 cas, soit si le bilan est déficitaire, soit si des ratios sont trop élevés, on va utiliser des produits apportant au sol des ions Mg^{2+} :

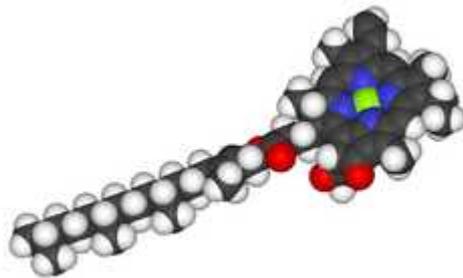
- soit des engrais magnésiens
- soit des amendements calciques et magnésiens, voire des amendements uniquement magnésiens (dolomie) lors d'un redressement de pH

4.4.5 Le magnésium dans la plante, symptômes de carence

Les parties jeunes ont des teneurs en Mg plus élevées. Les légumineuses sont très riches en magnésium.

Il est très important pour la plupart des fonctions vitales de la plante. Il est un des constituants de la chlorophylle et participe à la formation de pigments (carotènes, xanthophylle. Il intervient aussi dans la formation et la mise en réserve des sucres, protéines, vitamines.

Avec le potassium, il permet le maintien de la turgescence cellulaire nécessaire.



La carence en magnésium provoque des chloroses internervaires, relativement symétrique par rapport à la nervure médiane. Les espèces les plus sensibles sont le maïs, la betterave, les légumineuses, la pomme de terre, le tournesol, la tomate, la vigne, le pommier...

Exemple de symptôme de carence :



Détail des symptômes de carence en magnésium sur pommier.

4.4.6 Les engrais et amendements magnésiens

Nom	Teneurs en Mg	Remarque
 Kiesérite granulée	15% Mg(MgSO ₄), 20% S	
 Bittersalz (Sulfate de magnésium)	9.8% Mg(MgSO ₄), 13% S	Engrais foliaire
 Bittersalz 'microtop'	9.0% Mg(MgSO ₄), 12% S, 1% B, 1%Mn	Engrais foliaire ; contient aussi oligo : Bore, Manganèse
 Bittersalz 'combitop'	7.8% Mg(MgSO ₄), 13% S, 4% Mn, 1% Zn	Engrais foliaire ; contient aussi oligo : Zinc, Manganèse
 Patenkali	28 % K ₂ O 8% MgO	Soluble dans l'eau, pas plus de 3% de chlore
Amendements basiques calciques/magnésiens (mixtes)	10 à 30 % MgO 30 à 56 % MgO	
Dolomies	Différentes teneurs en : 17 à 21% MgO 25 à 30% CaO	Il s'agit d'un amendement basique magnésien, utilisable pour remonter le pH d'un sol
Chaux magnésienne vive	18 à 40% MgO 45 à 75% CaO	Il s'agit d'un amendement basique magnésien, utilisable pour remonter le pH d'un sol
Chaux magnésienne éteinte	Mg(OH) ₂	Il s'agit d'un amendement basique magnésien, utilisable pour remonter le pH d'un sol

4.6 Le calcium

4.4.1 Différentes formes du calcium

Le calcium est présent dans le sol sous trois formes :

- à l'état d'ions libres, en solution : Ca²⁺
- à l'état d'ions Ca²⁺ adsorbés sur le complexe, échangeables
- à l'état combiné, entrant dans la composition de minéraux primaires : CaCO₃, calcite des sols calcaires

Comme le potassium et le magnésium, il se trouve dans la matière organique sous forme ionique et donc libéré lors de la minéralisation sans être lui même minéralisé.

4.4.2 Quantités dans le sol

L'unité utilisée pour exprimer les quantités de potassium en agronomie est le CaO, donc en Kg de CaO/ha (ou unité de CaO).

Les quantités de calcium varient fortement selon les sols : il peut y avoir jusqu'à plusieurs centaines de tonnes de CaO total jusqu'à 100 tonnes pour les sols les plus riches, en sols calcaires.

Au laboratoire, l'analyse de sol exprime le plus souvent la part de Mg^{+} échangeable du sol, que l'on mesure aussi par échange en saturant l'échantillon de sol avec NH_4^{+} . Comme pour le potassium le MgO échangeable n'est en rien le magnésium disponible pour les végétaux.

4.4.3 Cycle du calcium

