

# la Fertilisation

---

<i>Chapitre I</i>	.....	le Sol
<i>Chapitre II</i>	.....	la Nutrition des Plantes
<i>Chapitre III</i>	.....	Lois Générales de la Fertilisation
<i>Chapitre IV</i>	.....	l'Humus
<i>Chapitre V</i>	.....	Calcium - Magnésium
<i>Chapitre VI</i>	.....	la Fertilisation Azotée
<i>Chapitre VII</i>	.....	la Fertilisation Phosphatée
<i>Chapitre VIII</i>	.....	la Fertilisation Potassique
<i>Chapitre IX</i>	.....	Eléments Secondaires. Oligo-éléments
<i>Chapitre X</i>	.....	les Engrais - FABRICATION - COMPOSITION - LÉGISLATION
<i>Chapitre XI</i>	.....	les Engrais - STOCKAGE - MANUTENTION - ÉPANDAGE
<i>Chapitre XII</i>	.....	le Plan de Fumure
<i>Chapitre XIII</i>	.....	Fertilisation - Environnement - Economie

---

*Crédits photos :*

*S.Henin - INRA - Laboratoire Europe Sols Toulouse -  
J-P Quillon - Rhône Poulenc - SCPA - Grance Paroisse S.A. -  
Elf Atochem - Sulphur Institute - Photothèque CEGELEC.*

# Editorial

---

Depuis sa création en 1972, la Fédération nationale de l'industrie des engrais, devenue maintenant l'**Union des Industries de la Fertilisation (UNIFA)**, a publié six éditions de la brochure "**La Fertilisation**", représentant au total 300 000 exemplaires. Si, depuis l'origine, cette brochure est avant tout destinée aux élèves de l'enseignement secondaire agricole, l'usage qui en a été fait prouve que ce document de synthèse est aussi fort utile à d'autres étudiants, aux techniciens, aux distributeurs d'engrais et aux agriculteurs.

La sixième édition, publiée en 1988, est épuisée. Depuis cette date, les contraintes environnementales maintenant bien codifiées, le bouleversement des conditions économiques - réforme de la politique agricole commune, accords du GATT - ont eu et auront encore des répercussions importantes sur l'agriculture française et donc sur l'emploi des engrais. De même, les progrès techniques en matière d'agronomie et de fertilisation entraînent des approches quelque peu différentes de cette dernière.

La septième édition de "La Fertilisation" devait donc prendre en compte ces évolutions. C'est ce qui a été fait notamment dans les chapitres sur les fertilisations azotée, phosphatée, potassique, le "plan de fumure", "Fertilisation - Environnement - Economie".

En revanche, les chapitres tels que "le sol", "la nutrition des plantes", "les lois générales de la fertilisation", "l'humus", ont été peu modifiés, seuls les points bien établis à ce jour et ayant une incidence sur la fertilisation y étant traités. Comme pour l'ensemble des questions traitées dans la brochure, les lecteurs désireux de précisions et de détails supplémentaires pourront se reporter à des ouvrages spécialisés en ces domaines.

Les conditions économiques actuelles amènent les agriculteurs à réfléchir encore plus que par le passé à la conduite de leur exploitation, notamment pour adapter leurs charges et améliorer leur compétitivité.

Ils doivent tenir compte également de l'environnement, en conciliant l'obtention de meilleurs rendements avec le respect du milieu naturel, grâce à la fertilisation raisonnée.

Puisse la septième édition de "La Fertilisation" contribuer à aider les agriculteurs français à relever ces défis.

UNIFA

# le Sol

## 1 DEFINITIONS

Le sol provient en général de l'altération sur place de la roche mère sous-jacente, sous l'influence de facteurs physiques, chimiques et biologiques. La roche mère est aussi appelée sous-sol.

La **pédologie** décrit les différents types de sols ainsi formés, en distinguant plusieurs horizons ; elle classe les sols et étudie leur évolution.

L'agronomie s'intéresse surtout à la **couche arable** et au sol sous-jacent, étudiés grâce à l'examen d'un **profil cultural**.

La **couche arable**, correspondant en général à l'horizon superficiel A des pédologues, est travaillée par l'agriculteur (labours et façons culturales) ; elle reçoit amendements et engrais. Sa couleur est en général plus foncée que celle de l'horizon sous-jacent par suite d'une teneur plus élevée en matière organique.

L'**horizon sous-jacent** constitue une zone intermédiaire, d'épaisseur très variable, entre la couche arable et la roche mère. Il contribue plus ou moins, selon les sols et la façon dont il est exploré par les racines, à la nutrition des plantes en éléments minéraux et en eau. Son importance est grande, tant pour le raisonnement de la fertilisation que pour l'implantation racinaire qui doit être facilitée au maximum.

## 2 LE MILIEU PHYSIQUE

### COMPOSITION DU SOL

Le sol comprend quatre composants principaux : l'air, l'eau, les constituants minéraux et la matière organique (figure 1.)

L'espace poreux (air et eau) peut occuper près de la moitié du volume total. Les proportions entre air et eau sont soumises à de grandes fluctuations, mais l'état d'humidité optimum pour la croissance des plantes correspond à des volumes sensiblement égaux en air et en eau.



Sol sur granit avec un horizon sous-jacent bien exploité par les racines.

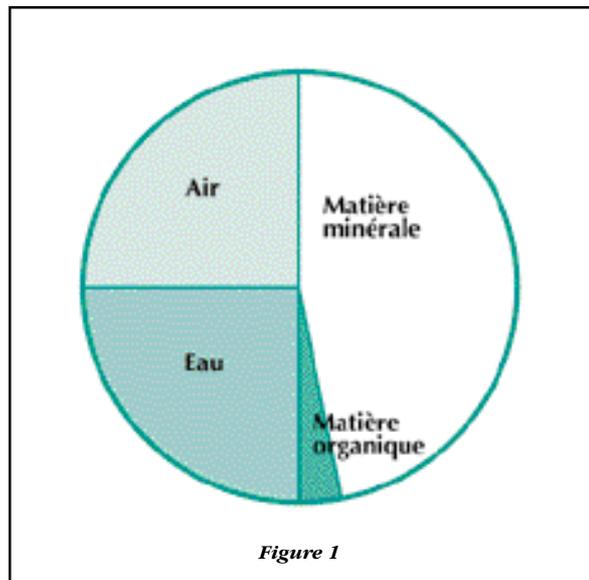


Figure 1

Exemple de partage des composants principaux dans un sol cultivé (en volume).

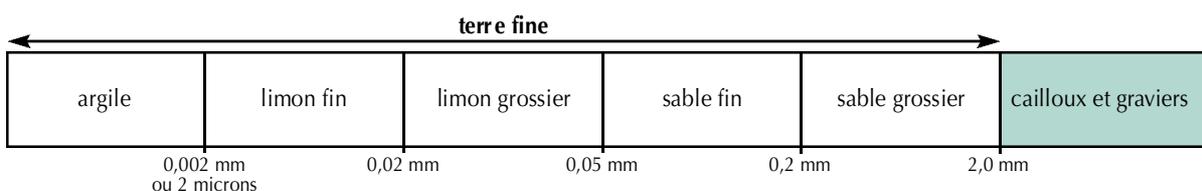


Figure 2

**CONSTITUANTS MINÉRAUX DU SOL**  
**ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE • TEXTURE**

Le tamisage d'un sol à travers un tamis à trous ronds de 2 mm de diamètre permet de séparer les cailloux et graviers de la terre fine. Après élimination de la matière organique, on procède à l'**analyse granulométrique (ou physique)** de la terre fine, d'après la classification conventionnelle des particules minérales (voir figure 2).

Constituées surtout par des silicates d'alumine hydratée et souvent colorées en rouge par des oxydes de fer, les **particules argileuses** jouent un rôle important dans la mise en réserve des éléments nutritifs présents dans le sol. Les analyses de sol (cf. paragraphe 5) sont interprétées en fonction de la quantité et de la nature des argiles ou en fonction de la CEC (capacité d'échange cationique).

Les proportions respectives de sables, limon et argile permettent de définir la **texture** du sol (figure 3). Sa connaissance est utile pour prévoir le comportement global du sol (réserve en eau, battance, etc.), son potentiel de production, les dates et types d'interventions culturales. A défaut d'une carte des sols de la région, l'agriculteur a intérêt à bien définir les différents types de sols rencontrés sur son exploitation au moyen d'une analyse granulométrique.

Certaines terres contiennent en outre une proportion variable de particules calcaires, composées de carbonate de calcium plus ou moins pur. Des méthodes d'analyse granulométrique, adaptées aux terres calcaires, classent ces particules dans les différentes fractions citées (figure 2), suivant leurs dimensions.

**MATIÈRE ORGANIQUE**  
**STRUCTURE DU SOL**

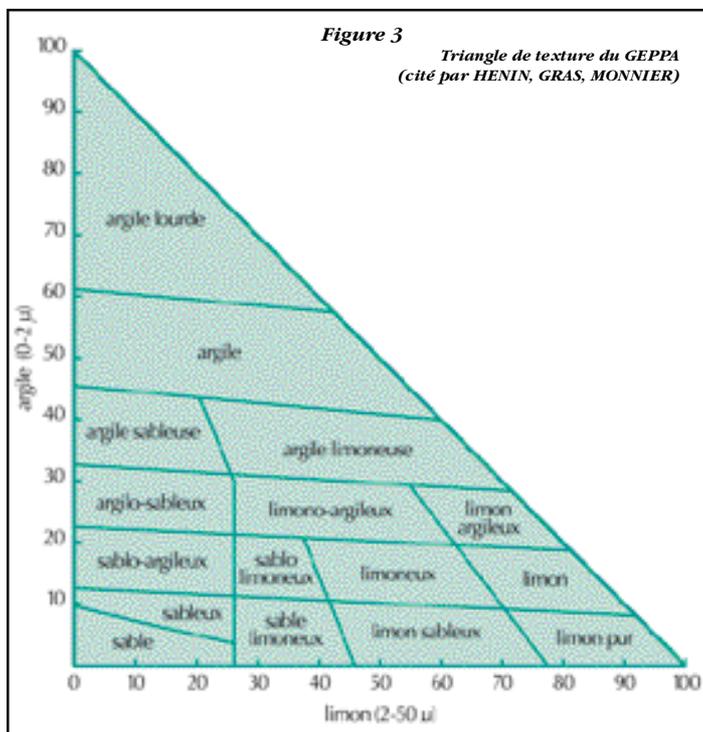
La fraction solide de la terre fine comprend généralement 2 à 5 % de matière organique et 95 à 98 % de matière minérale. La matière organique (M.O.) comprend tous les constituants du sol formés d'hydrate de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et le plus souvent d'azote, et ne comprend pas les êtres vivants : biomasse microbienne et mycélienne, micro et mesofaune, racines vivantes, et microflore.

On distingue également :

- d'une part, la matière organique libre, séparable par des moyens physiques, correspondant aux débris végétaux (résidus culturels divers, racines mortes),
- d'autre part, la matière organique liée, non séparable par des moyens mécaniques, c'est-à-dire associée aux minéraux du sol (constituants biologiques ou humifiés).



*Cristaux d'argile vus au microscope électronique (grossissement 100.000 fois)*



---

Une partie de la M.O. donne naissance à une matière de couleur foncée, l'humus, qui est l'ensemble des constituants organiques du sol n'ayant plus d'organisation biologique (végétale, animale, bactérienne) identifiable, issus de l'évolution biochimique généralement lente des diverses matières organiques présentes ou incorporées au sol.

L'argile et l'humus sont des colloïdes, substances insolubles qui peuvent se mettre en suspension dans l'eau et y demeurer à l'état dispersé.

Dans le sol, grâce à la présence de calcium, les colloïdes sont floculés et s'associent pour former le **complexe argilo-humique**, essentiellement chargé négativement (cf. paragraphe 3), dans lequel l'humus joue un rôle protecteur vis-à-vis de l'argile.

Les éléments constitutifs de la fraction "terre fine" soudés par l'humus forment des **agrégats**, ayant une certaine stabilité, qui ménagent entre eux des espaces lacunaires remplis d'air et d'eau. Les **agrégats** se rassemblent à leur tour pour former des mottes.

Forme, taille et disposition des agrégats caractérisent la **structure du sol**. Celle-ci doit être à la fois :

- **stable**, pour que les racines puissent explorer en permanence un grand volume de terre. Dans un sol de richesse donnée, l'utilisation des ressources nutritionnelles dépend de l'importance et de la répartition du système racinaire.
- **poreuse**, de façon à permettre la circulation de l'air et de l'eau. La porosité est liée au volume des espaces lacunaires ménagés entre les particules élémentaires (microporosité) et les agrégats qu'elles constituent (macroporosité).

Quand le sol reste gorgé d'eau faute d'écoulement dans le sous-sol, les racines sont asphyxiées, les plantes jaunissent et meurent, tandis que la flore microbienne aérobie n'est plus en mesure de décomposer normalement les déchets organiques.

Le maintien de la stabilité structurale peut être obtenu :

- dans un sol acide, par le **chaulage** qui facilite la floculation du complexe argilo-humique.
- **en restituant le maximum de matière organique pour renforcer le complexe. La fertilisation accroît l'importance des restitutions organiques par les résidus de récolte et la masse racinaire restant dans le sol.**
- par un **travail adéquat du sol** : l'évacuation de l'eau en excès est facilitée par l'époque, la profondeur et la forme

des labours et des façons superficielles, ainsi que par le drainage.

- en utilisant au mieux avec les façons culturales (labour) l'action des agents climatiques : gel, alternances de dessiccation et d'humectation.
- en favorisant le développement de la faune du sol, fonction de la teneur en calcaire et en matière organique, du pH, de l'aération, de l'humidité.

Certaines pratiques culturales inadaptées au type de sol (émiettement trop fin d'un sol battant), ou effectuées à contretemps (passages d'outils pesants sur le sol non ressuyé, etc.) provoquent une détérioration de la structure du sol, qui aura des conséquences néfastes sur son potentiel de production et sur l'efficacité des éléments fertilisants.

Si la structure est trop dégradée, le moyen le plus sûr de régénération consiste à laisser reposer le sol quelques années sous une prairie temporaire bien fertilisée et bien exploitée.



*Bon développement du maïs dans un sol à structure grumeleuse.*

### **EAU DU SOL**

La réserve en eau du sol assure la quasi totalité des besoins en eau de la plante : selon les espèces végétales, il faut de 250 à 800 litres d'eau pour former 1 kilo de matière sèche.

Par ailleurs, l'eau dissout les éléments nutritifs pour constituer la solution du sol (cf. paragraphe 3). L'alimentation du végétal s'effectue à partir de la solution du sol à travers les surfaces absorbantes des racines.

### **EAU UTILISABLE PAR LA PLANTE**

Immédiatement après une forte pluie, l'eau occupe l'ensemble des cavités ou "pores" du sol. Après ressuyage, l'eau n'occupe plus que les micropores (inférieurs à 30 microns) alors que les macropores se sont remplis d'air. Le sol a atteint sa capacité de rétention au champ, exprimée en grammes d'eau fixés pour 100 g de terre fine et sèche.

En l'absence de nouvelles pluies, les plantes finissent par flétrir, le jour d'abord, puis nuit et jour. Le **point de flétrissement** est atteint. Il reste cependant de l'eau inutilisable par la plante autour des particules de terre et dans les plus petits des micropores (inférieurs à 0,2 micron) :

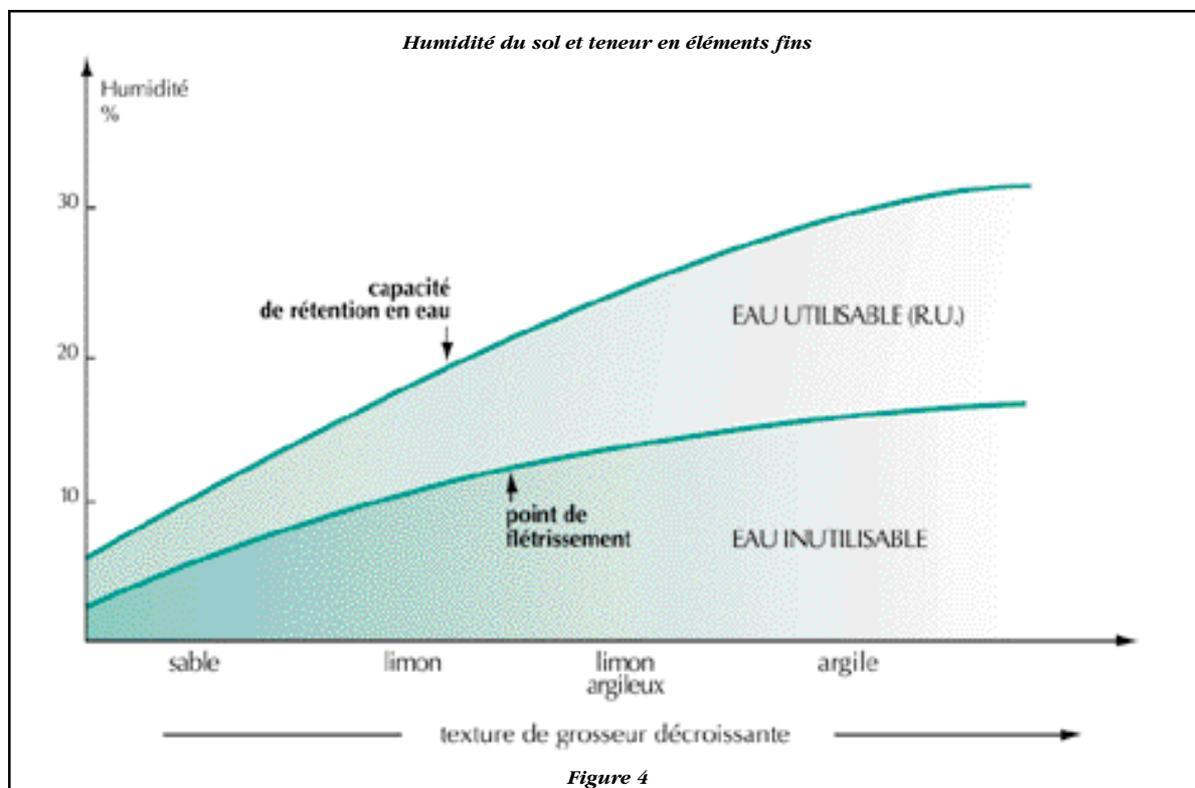
5% pour les sols sableux, 15 % pour les sols argileux. La réserve d'eau utilisable (R.U.) par la plante, ou capacité utile, est donc celle comprise entre la capacité de rétention au champ et le point de flétrissement (figure 4). Plus la texture d'un sol est fine, plus sa réserve en eau est élevée.

### **MOUVEMENTS DE L'EAU DANS LE SOL**

La part de l'eau qui s'infiltre dans le sol est d'autant plus importante que :

- sa surface offre plus d'obstacles au ruissellement
- la structure est plus grossière (présence de grosses mottes).

L'eau d'infiltration percole par les canaux capillaires, se chargeant sur son passage en oxygène, gaz carbonique et sels minéraux, et imbibant les particules de terre de cette solution. Durant les périodes humides de l'automne et de l'hiver, ou en cas d'irrigation mal conduite, une partie de l'eau d'infiltration peut être perdue par drainage. Cette eau est chargée de sels minéraux, d'où des pertes en éléments minéraux qui peuvent atteindre, par hectare et par an, 200 à 600 kg de chaux, 0 à 50 kg d'azote, mais aussi du soufre-sulfate, de la magnésie et de la potasse. Par contre, le phosphore n'est pratiquement pas entraîné.





▲ Irrigation du maïs au moment de la floraison.

*Betterave souffrant de la sécheresse.*



Quand la surface du sol s'assèche, l'eau est soumise à des mouvements ascendants ou latéraux, au fur et à mesure de son absorption par les racines. Cette diffusion capillaire permet l'apport vers les racines de quantités suffisantes d'éléments tels que calcium ou magnésium, mais n'assure qu'une part bien plus réduite de l'alimentation en potassium ou phosphore. Celle-ci s'effectue principalement aux dépens des agrégats situés à proximité des racines, en fonction de leur développement.

Les mouvements ascendants de l'eau dont la vitesse est liée à la finesse des particules et au degré de tassement du sol, sont trop lents et trop limités pour assurer un approvisionnement susceptible d'équilibrer les pertes des couches superficielles. Ces pertes, sous forme de vapeur d'eau, sont dues à l'évaporation à la surface du sol et à la transpiration par les feuilles.

### **L'EAU ET LA FERTILISATION**

L'évapotranspiration (**ETR = évapotranspiration réelle**), conséquence des conditions climatiques, peut être réduite (brise-vents, paillage,...) ou augmentée (irrigation).

En l'absence d'irrigation, l'eau est souvent un facteur limitant du rendement, notamment pour les cultures d'été. La fertilisation améliore la résistance des plantes à la sécheresse, en favorisant le développement racinaire et les mouvements d'ouverture et de fermeture des stomates.

L'irrigation à des périodes critiques de la végétation entraîne un accroissement des rendements et, en corollaire, une augmentation des besoins minéraux et des exportations. Le niveau de fertilité doit être à l'optimum, et la fertilisation d'entretien portée à un niveau correspondant à l'intensité de ces besoins.

### 3 LES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES

#### LE POUVOIR ADSORBANT DU COMPLEXE ARGILO-HUMIDE

Un sel minéral, en dissolution dans l'eau du sol, s'y trouve en partie à l'état dissocié, c'est-à-dire scindé en deux ions :

- l'un chargé négativement : l'**anion** ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4 \text{H}^{2-}$ )
- l'autre chargé positivement : le **cation** ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ , etc.).

Le complexe argilo-humique possède la propriété de retenir à sa surface certains ions de la solution du sol (**pouvoir adsorbant**). Chargé négativement, il attire surtout les cations (figure 5).

#### LES ECHANGES D'IONS ENTRE LE COMPLEXE ET LA SOLUTION DU SOL

Dans la solution entourant les molécules colloïdales, les cations se déplacent continuellement, à l'image des abeilles d'un essaim. La majorité des abeilles est au coeur de

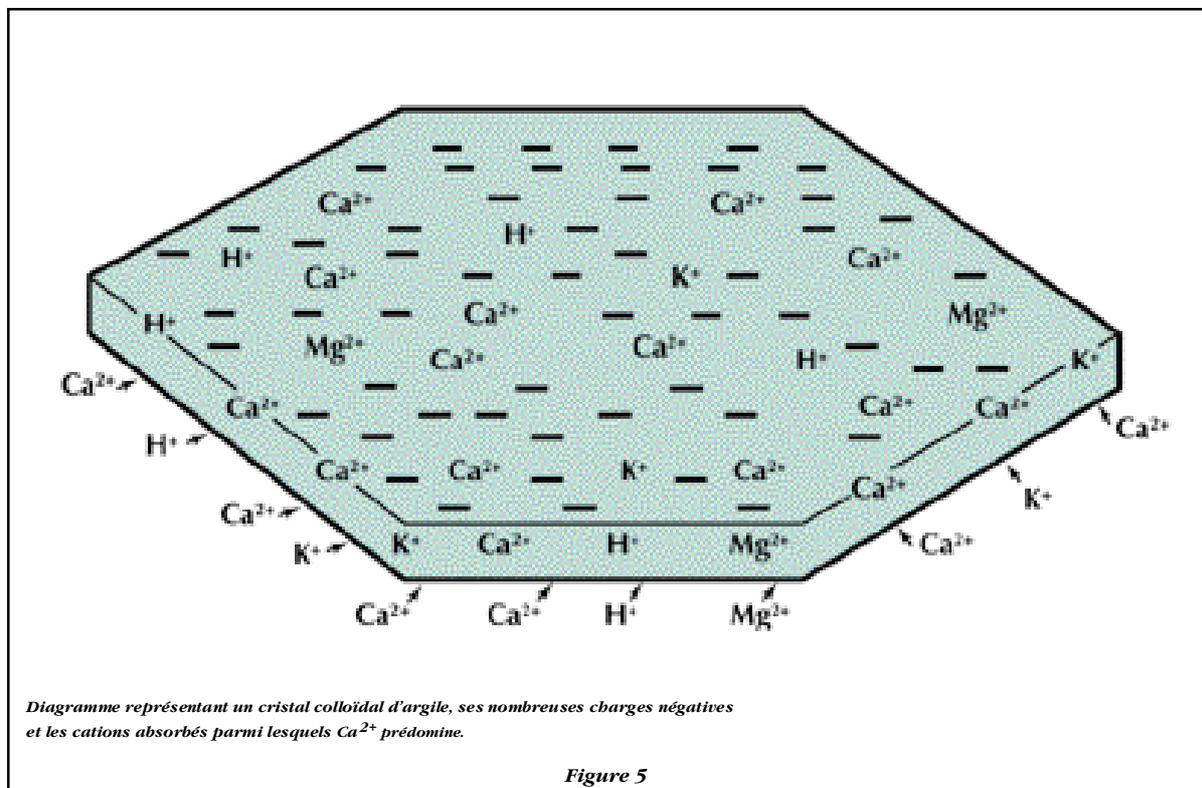
l'essaim, bien que chacune d'elles s'en éloigne de temps en temps pour y revenir. Les cations en mouvements représentent les éléments minéraux à l'état **échangeable** et sont biodisponibles.

L'hydrogène ( $\text{H}^+$ ) est le cation le plus énergiquement retenu ; viennent ensuite les oligo-éléments, le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), le magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), le potassium ( $\text{K}^+$ ) et, loin derrière, le sodium ( $\text{Na}^+$ ).

L'anion phosphate ( $\text{PO}_4 \text{H}^{2-}$ ) est fixé sur le complexe argilo-humique par l'intermédiaire d'ions  $\text{Ca}^{2+}$  et sur les hydroxydes de fer et d'alumine chargés positivement. D'autres anions (borate, sulfate) sont faiblement fixés. Les chlorures et les nitrates ne sont pas retenus par le sol.

Les conséquences de ces propriétés sont très importantes en matière de fertilisation :

- les ions  $\text{PO}_4 \text{H}^{2-}$  et, dans une moindre mesure, les ions  $\text{K}^+$ , sont fixés par le complexe ; ils sont peu mobiles, en particulier l'ion phosphate, et diffusent lentement dans la solution du sol. L'ordre de grandeur des distances maximales sur lesquelles s'opère la diffusion est de l'ordre du millimètre pour  $\text{PO}_4 \text{H}^{2-}$ , du centimètre pour  $\text{K}^+$  et du décimètre pour  $\text{NO}_3^-$



- Les engrais azotés minéraux apportent l'azote soit sous forme du cation  $\text{NH}_4^+$  fixé par le complexe, soit sous forme de l'anion nitrate  $\text{NO}_3^-$  susceptible de descendre, selon la texture et la structure des sols, de 1 cm pour 3 à 8 mm de pluie efficace (P - ETR).

### L'IMPORTANCE DU COMPLEXE ADSORBANT ET SA SATURATION

Le complexe adsorbant d'un sol est saturé quand tous les ions  $\text{H}^+$  sont remplacés par des cations tels que  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ . La quantité maximum de cations qu'un sol peut fixer détermine la capacité totale d'échange (T) ou **Capacité d'échange cationique C.E.C.**, exprimée en centimole par kilogramme ( $\text{cmol.Kg}^{-1}$ ) de terre sèche et fine. Elle varie selon les sols (quantité et nature de l'argile - taux de matière organique) de 2 à 50. Elle est faible quand elle est inférieure à 10, élevée quand elle est supérieure à 20 ( $1\text{cmol. Kg}^{-1} = 1\text{ meq. } 100\text{ g}^{-1}$ ).

**La somme des bases échangeables (S)** est la somme des cations métalliques fixés sur le complexe adsorbant d'un sol à un moment donné.

**Le taux de saturation** ( $v = \frac{S}{T} \times 100$ ) est plus ou moins élevé selon que le complexe est plus ou moins saturé en cations métalliques. Le sol est acide quand le taux de saturation est inférieur à 90 %.

L'agriculteur, pour obtenir l'efficacité maximale de la fertilisation, devra s'efforcer :

- de maintenir la capacité d'échange cationique du complexe par la formation d'humus. C'est l'un des buts recherchés en enfouissant des amendements humiques, et les résidus de culture.
- de saturer le complexe par les amendements calcaires ; l'apport est fonction de la capacité d'échange cationique.

L'interprétation des analyses de sol concernant le calcium, le potassium, le magnésium, est faite en fonction de la CEC.

### LA REACTION DU SOL OU pH

La concentration en ions hydrogène  $\text{H}^+$  d'un milieu chimique détermine sa réaction mesurée par le pH, qui varie de 0 à 14.

Le pH d'un sol est la mesure de la quantité d'ions  $\text{H}^+$  libres dans l'eau (pH eau) : c'est l'acidité active). Mais les ions  $\text{H}^+$  de la solution sont en équilibre avec ceux fixés par le complexe qui représentent l'acidité potentielle.

Cette dernière est de 1.000 à 100.000 fois plus élevée que l'acidité active.

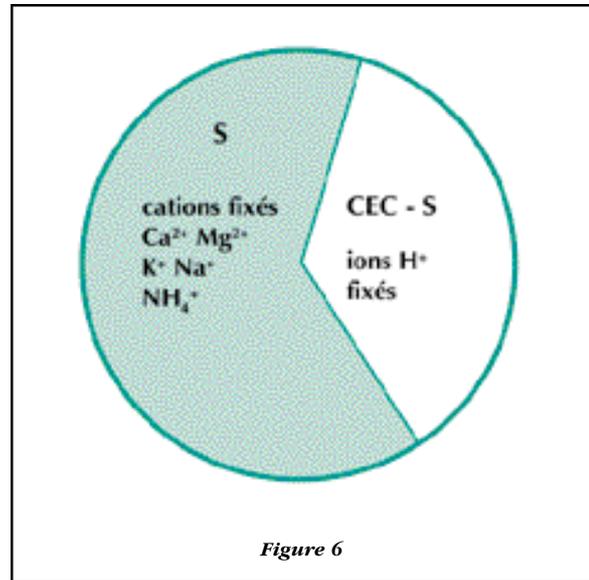


Figure 6

Un sol est dit :

**acide** pour un pH eau inférieur à 6,8

**neutre** pour un pH eau compris entre 6,8 et 7,2

**alcalin** pour un pH eau supérieur à 7,2.

Le pH eau d'un sol varie avec la saison et l'intensité de la culture.

**Le pouvoir tampon** du sol est la faculté de résister aux variations rapides du pH. Il est d'autant plus fort qu'il est riche en colloïdes argilo-humiques. L'acidité d'un sol sableux se corrige plus vite et avec de moindres quantités de chaux que celle d'un sol argileux. Par contre, elle exige des apports plus fréquents.

Cette notion de pouvoir tampon est également utilisée pour le phosphore et le potassium à propos de leur variation de concentration dans la solution du sol.

### MODIFICATIONS DU pH DES SOLS CULTIVES

Sous climat tempéré humide, le sol a une tendance naturelle à s'acidifier du fait de l'entraînement en profondeur des cations, principalement du  $\text{Ca}^{2+}$ . La fertilisation intensive accentue ce phénomène.

La **décalcification** constitue la phase préliminaire de l'acidification, mais tant que la réserve de  $\text{Ca}^{2+}$  dans le sol est suffisante, sa disparition progressive n'implique pas l'acidification. Celle-ci apparaît quand les ions  $\text{H}^+$  deviennent prédominants dans le complexe par suite de la disparition des cations  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ .

---

## 4 LE SOL, MILIEU BIOLOGIQUE

Le sol est un **milieu vivant** dans lequel se développe une multitude d'organismes variés appartenant aux règnes animal et végétal.

### LA FAUNE DU SOL

La **macrofaune** est représentée par des rongeurs, des arthropodes, des mollusques et des annélides. Les plus utiles de ces animaux sont, sans conteste, les **vers de terre** qui améliorent la structure et contribuent au brassage des couches du sol. Quand leur développement est favorisé par un pH voisin de la neutralité, une humidité modérée et des apports organiques, leur poids peut atteindre jusqu'à 4 tonnes par hectare.

Certains arthropodes (vers blancs, taupins) ont un effet nuisible en raison des dégâts qu'ils provoquent aux cultures.

La **microfaune** du sol a surtout un rôle de stimulation et de rajeunissement de la flore du sol.

### LA FLORE DU SOL

Elle comprend algues, champignons, actinomycètes et bactéries. Ces dernières sont souvent regroupées avec la microfaune sous le nom de micro-organismes du sol.

Les bactéries dégradent la lignine, la cellulose, les protéines, les matières organiques, etc ; elles interviennent dans diverses étapes essentielles du cycle des éléments fertilisants (N, P, S) et favorisent la synthèse des substances de croissance.

Les champignons agissent sur les processus de formation de l'humus et la stabilisation des agrégats. Certains d'entre eux, les hyménomycètes, infestent les racines des plantes pour former une association nommée mycorhize. Le parasite peut digérer et transmettre à l'hôte certaines substances que ce dernier ne peut obtenir facilement lui-même.

Cet effet bénéfique a été surtout observé en sols forestiers.

Les techniques de culture doivent tendre à améliorer les conditions de milieu favorables à l'activité des micro-organismes.



*L'enfouissement des débris végétaux favorise le développement des vers de terre.*

## 5 LA CONNAISSANCE DU SOL : LES ANALYSES

*Pour le praticien, l'analyse a pour but de :*

- connaître les propriétés physiques, chimiques et parfois biologiques du sol.

Elle est dite complète quand elle comporte l'analyse physique et l'analyse chimique, incluant le dosage de certains oligo-éléments comme le fer, le manganèse, le cuivre, le zinc et le bore.

Cette analyse de caractérisation contribue à fixer la conduite à tenir en matière de choix des systèmes de culture, des techniques culturales et de fertilisation.

- suivre l'évolution de la fertilité du sol. Ce sera en ce cas une analyse chimique seule, mais répétée aux mêmes endroits et prélevée à la même période à intervalles de quelques années (4 à 5 ans).

C'est l'**analyse de contrôle**.

L'AFNOR a conduit depuis 1980, avec l'aide des spécialistes de l'analyse agronomique [en particulier le Groupe d'Etudes Méthodologiques pour l'Analyse des Sols (GEMAS)], des travaux ayant pour objet la normalisation de méthodes de références pour l'analyse des sols. Un recueil AFNOR publié en juillet 1996, rassemble 44 normes traitant des analyses nécessaires à l'appréciation de la "qualité des sols".

(AFNOR - Tour Europe - 92049 Paris-la Défense Cedex - Tél. : 01 42 91 55 55).

### **PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS**

#### **Méthode AFNOR X 31-100**

Le **prélèvement** constitue une **opération très importante**, car l'échantillon doit être représentatif de la composition et de la richesse du sol. En général, il est effectué sur l'épaisseur de la couche arable (profondeur du labour) ; dans le cas de plantations d'arbres fruitiers et de vignes, il est nécessaire de prélever un échantillon distinct sur l'horizon sous-jacent.

Sur une zone **homogène** n'excédant pas 5 hectares, on prend à la sonde une quinzaine (minimum) de prélèvements élémentaires que l'on mélange **soigneusement** pour ne conserver que 500 grammes environ de terre ; cet échantillon moyen est mis à sécher quelques jours sous abri avant d'être expédié en laboratoire.

La date de prélèvement importe peu à condition qu'elle n'intervienne pas immédiatement après un apport d'engrais (respecter un délai de 1 à 3 mois), un chaulage ou un apport de fumier (délai de 6 mois).



*Prélèvement d'un échantillon de terre.*

La **fiche de renseignement**, fournie par le laboratoire, doit être **remplie avec soin** et accompagner l'échantillon, faute de quoi aucun conseil sérieux ne pourrait être donné.

### **ANALYSE PHYSIQUE**

*Elle comporte trois déterminations principales :*

- L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE (AFNOR X 31-107) qui définit les teneurs en argile, limons et sables de la terre fine.
- Le dosage du CALCAIRE TOTAL et du CALCAIRE ACTIF (AFNOR X 31-105 et X 31-106), ce dernier notamment pour les plantations d'arbres fruitiers et de vignes.
- Le TAUX DE MATIERE ORGANIQUE (AFNOR X 31-109), par dosage du carbone organique (Méthode ANNE :  $MO = \text{carbone organique} \times 1,72$  ou  $2,00$  suivant les sols).

Le dosage de l'azote total (Méthode KJELDAHL- AFNOR X 31-111) permet de calculer le **RAPPORT C/N** qui traduit l'intensité de l'activité biologique du sol.

Un rapport C/N voisin de 10 est l'indice d'un sol sain où la vie microbienne est active.

---

### ***ANALYSE CHIMIQUE***

Elle a pour but d'évaluer les quantités d'éléments nutritifs que le sol est capable de mettre à la disposition des plantes.

Elle comporte la détermination du pH, le dosage du phosphore et des bases échangeables, éventuellement du soufre et de certains oligo-éléments.

pH - (AFNOR X 31-104)

Sa mesure se fait le plus souvent par électrométrie en utilisant un pH-mètre. Le sol est mis en suspension soit dans l'eau distillée (on obtient le "pH eau"), soit dans une solution de chlorure de potassium (pH KCl). Le pH KCl donne des valeurs plus basses, mais moins fluctuantes selon les périodes de l'année, que le pH eau.

PHOSPHORE "EXTRACTIBLE"

(appelé improprement "assimilable")

Il existe différentes méthodes chimiques d'extraction, dont le but est d'estimer la part du phosphore, exprimé en anhydride

phosphorique ( $P_2O_5$ ), présent dans le sol et susceptible de participer à l'alimentation des végétaux.

Les principales méthodes utilisées en France sont :

- méthode DYER (AFNOR X 31-160) pour les sols acides ou neutres (extraction par l'acide citrique à 2%)
- méthode JORET-HEBERT (AFNOR X 31-161) pour les terres calcaires (plus de 2%) et les limons au voisinage de la neutralité (extraction par l'oxalate d'ammonium).

Ces méthodes permettent de mettre en solution le  $P_2O_5$  dit "assimilable" qui est ensuite dosé par photolorimétrie et exprimé en pour mille (‰) de terre fine et sèche, ou en ppm (parties par million) ou en mg/kg. La méthode DYER majore le phosphore extractible dit "assimilable" dans les situations où il y a eu des apports de phosphates tricalciques (phosphate naturel).

- méthode OLSEN (NF ISO 11263/1) où l'extractif est le bicarbonate de sodium. Cette méthode pourrait prendre un développement important pour les sols neutres et calcaires. Le problème, encore plus pour le phosphore que pour les autres éléments, est d'apprécier le plus exactement possible



*Chaîne d'analyses granulométriques automatiques (Laboratoire Europe Sols de Toulouse)*

la biodisponibilité de l'élément concerné par la plante. Des méthodes de laboratoire permettent de mesurer le **pouvoir fixateur** du sol vis-à-vis de P, c'est-à-dire la facilité plus ou moins grande qu'il a de céder les ions  $PO_4^{3-}$  aux plantes (de même pour K).

- méthodes INRA (P solution du sol, et valeur F de GACHON).
- méthode de dilution isotopique de FARDEAU : rapport r1/R (1)
- méthode de Van der Marel pour le potassium.

#### CATIONS "ECHANGEABLES" - (AFNOR X 31-108)

L'extraction par une solution d'acétate d'ammonium neutre, suivie d'une lecture au spectrophotomètre, permet le dosage des cations déplacés par  $NH_4^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ .

Les teneurs du sol en potasse et magnésie échangeables sont exprimées en % ou en ppm, respectivement en  $K_2O$  et  $MgO$ .

#### Capacité d'échange cationique-CEC (AFNOR X 31-130)

Dans des conditions déterminées, on réalise l'échange entre les cations d'un échantillon de sol et les ions ammonium d'une solution aqueuse molaire et neutre d'acétate d'ammonium.

La CEC est alors déterminée par le dosage des ions ammonium échangés (après extraction des ions ammonium fixés sur le sol par une solution aqueuse molaire de chlorure de sodium). On utilise comme unité la centimole de charges positives par kilogramme :  $(cmol^+ \cdot Kg^{-1})$  pour exprimer le résultat.

#### AUTRES ELEMENTS FERTILISANTS

Éléments secondaires et oligo-éléments sont l'objet de déterminations dans les situations où ils posent des problèmes de fertilisation (Voir normes AFNOR X 31-120 et X 31-121 pour le fer, manganèse, cuivre, zinc, et X 31-122, pour le bore).

*Proposition de seuils en matière de  $P_2O_5$  (valeurs indicatives)  
établis à partir des essais agronomiques de longue durée.  
Méthode Joret-Hébert*

Types de sol	EXIGENCE DES CULTURES					
	Faible		Moyenne		Forte	
	Trenf	Timp	Trenf	Timp	Trenf	Timp
Argilo-calcaires profonds	50	120	80	120	120	180
Argilo-calcaires superficiels	(70)	150	(80)	180	(140)	200
Craies de Champagne et autres	200	260	(250)	300	(280)	400
Limons divers	(70)	150	(100)	160	(100)	160
Sables	40	130	60	160	(60)	160

( ) : Données associant des résultats expérimentaux et l'expertise du Groupe PK du COMIFER/ Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée.

Trenf = T renforcée : teneur au dessous de laquelle il est nécessaire d'apporter une dose supérieure à la seule fumure d'entretien.

Timp = T impasse : teneur du sol au dessus de laquelle la suppression de fumure sur une culture en place de faible ou moyenne exigence n'entraîne pas de chute de rendement statistiquement et économiquement significative.

(1) nota  
rapport r1/R : r1 est la Q de radioactivité restant en solution une minute après l'injection de la quantité R de radioactivité qui est un indicateur du pouvoir fixateur du sol

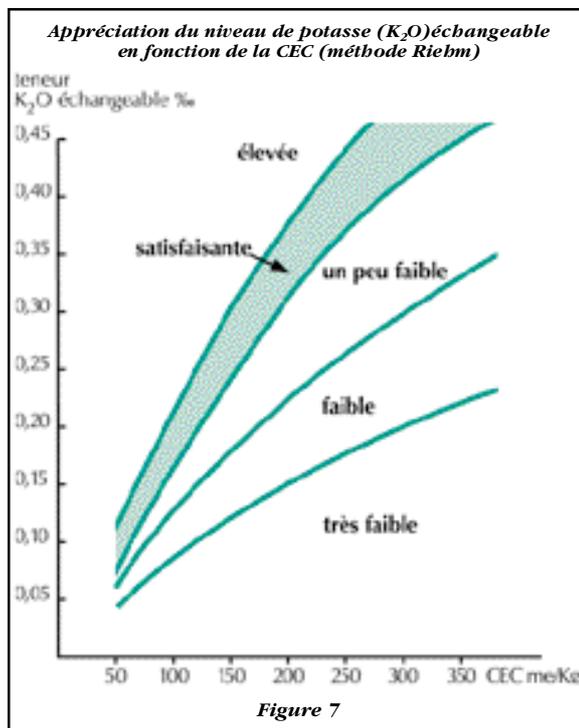
## RESULTATS ET INTERPRETATION DES ANALYSES DE SOL

Les résultats des dosages doivent être accompagnés d'un commentaire et de conseils pouvant aller jusqu'au PLAN DE FUMURE.

- Les **résultats** sont indiqués avec les méthodes appliquées et les **teneurs souhaitables par rapport au type de sol et à la région**.

A titre d'exemple, on peut donner l'abaque ci-contre (figure 7), utilisé pour situer le niveau d'un sol en  $K_2O$ , et le tableau précédent pour le phosphore extractible Joret-Hébert.

- **Les commentaires et les conseils** indiquent les corrections éventuelles à apporter au sol en tel ou tel élément et la façon d'y procéder selon les cultures envisagées (fumures d'entretien, de redressement, plan de fumure, etc.).



*Un bon labour sur un sol bien ressuyé, contribue à maintenir la structure du sol.*

# La Nutrition des Plantes

## 1 LES ELEMENTS NUTRITIFS INDISPENSABLES

Pour se développer, les plantes prélèvent dans le milieu qui les entoure - atmosphère, eau et sol - les éléments nécessaires à la constitution de leurs tissus.

L'analyse de la matière sèche des végétaux fait apparaître la présence de constituants indispensables :

- 9 éléments dits "plastiques" qui participent à la formation des tissus végétaux, et qui représentent 99 % de leur masse.

- des éléments appelés "oligo-éléments" présents en très faibles quantités.

Composition moyenne du végétal en % de la matière sèche			
• ELEMENTS PLASTIQUES			
Carbone (C)	42 %	Azote (N)	2,0 %
Oxygène (O)	44 %	Phosphore (P)	0,4 %
Hydrogène (H)	6 %	Soufre (S)	0,4 %
		Potassium (K)	2,5 %
		Calcium (Ca)	1,3 %
		Magnésium (Mg)	0,4 %
• PRINCIPAUX OLIGO-ELEMENTS : Fer, Manganèse, Cuivre, Zinc, Bore, Molybdène			
• AUTRES ELEMENTS : Chlore, Sodium, Silicium, Cobalt.			

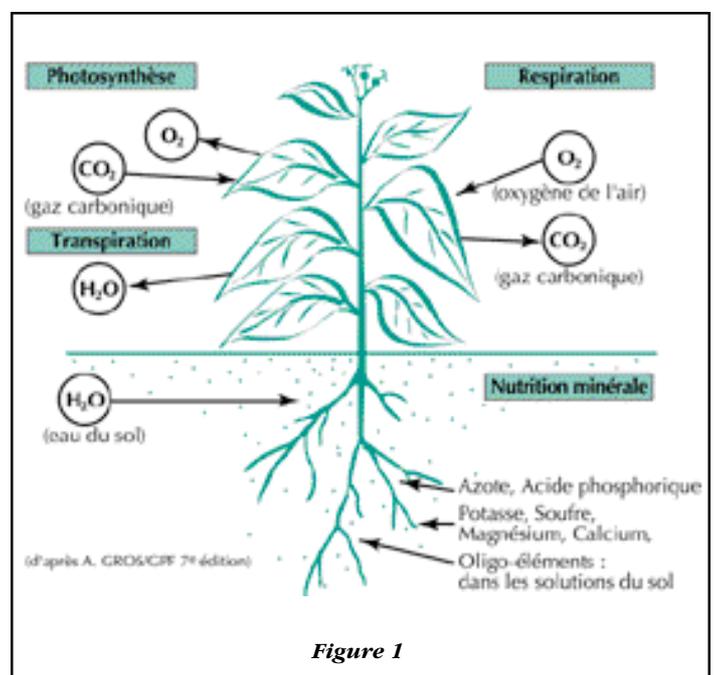
## 2 SOURCES DES ELEMENTS NUTRITIFS

La plante trouve dans l'air, sous forme de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), le carbone et l'oxygène qu'elle fait entrer dans la formation des glucides par le jeu de la photosynthèse et de l'assimilation chlorophyllienne. Elle peut également y trouver, sous forme de SO<sub>2</sub>, une partie du soufre qui lui est indispensable.

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

L'azote est, pour la plupart des plantes, prélevé dans le sol sous forme minérale (nitrique ou ammoniacale) et, pour les légumineuses, directement prélevé dans l'air du sol par les bactéries des nodosités racinaires.

Les éléments minéraux (P, K, Ca, Mg, la plus grande partie de S et les oligo-éléments) proviennent du sol où les racines les absorbent à partir de solutions très diluées.



### 3 RÔLE DES ÉLÉMENTS NUTRITIFS

Tous ces éléments ne jouent pas le même rôle dans la nutrition végétale. Les uns (oxygène, carbone, hydrogène, azote, phosphore, soufre) sont les constituants de base des tissus végétaux et sont assemblés au cours des synthèses organiques. D'autres, les cations (potassium, calcium, magnésium) ont principalement pour rôle de maintenir dans le milieu interne un équilibre avec les anions. D'autres enfin (les oligo-éléments) ont un rôle de catalyseurs des réactions du métabolisme. Ces éléments constituent un ensemble où chacun d'entre eux est strictement indispensable.

### 4 ABSORPTION DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX ET FERTILISATION

L'absorption des éléments minéraux par le système racinaire est faite sélectivement, selon des proportions déterminées ; si l'un (ou plusieurs) de ces éléments est en quantité insuffisante dans le sol, la plante ne peut plus se développer normalement, les rendements en sont affectés, des symptômes visibles de carence peuvent même apparaître.

La nutrition des plantes se caractérise par :

- **ses besoins totaux.** Au cours de leur cycle végétatif, les plantes annuelles prélèvent dans le sol des quantités d'éléments nutritifs très variables.

Pour l'azote et le potassium, les besoins peuvent dépasser plusieurs centaines de kilos à l'hectare : par exemple, pour  $K_2O$ , 250 à 300 kg pour un blé, 500 kg pour une luzerne ou un ray-grass

Pour le phosphore, ils se situent en moyenne à 60-90 kg par hectare, exprimés en  $P_2O_5$ .

Pour les éléments secondaires (S, Mg, Ca), les besoins totaux des plantes sont en général de 50 à 100 kg par hectare, exprimés en oxydes ( $SO_3$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ) (cf. chapitres V et IX).

Pour les oligo-éléments (cf. chapitre IX), les besoins annuels par hectare varient de quelques grammes à quelques centaines de grammes.

Pour une même plante, les besoins totaux sont fonction du rendement. Il ne faut pas confondre les besoins totaux avec les **exportations** qui sont les quantités réellement enlevées du sol par les récoltes et non restituées.

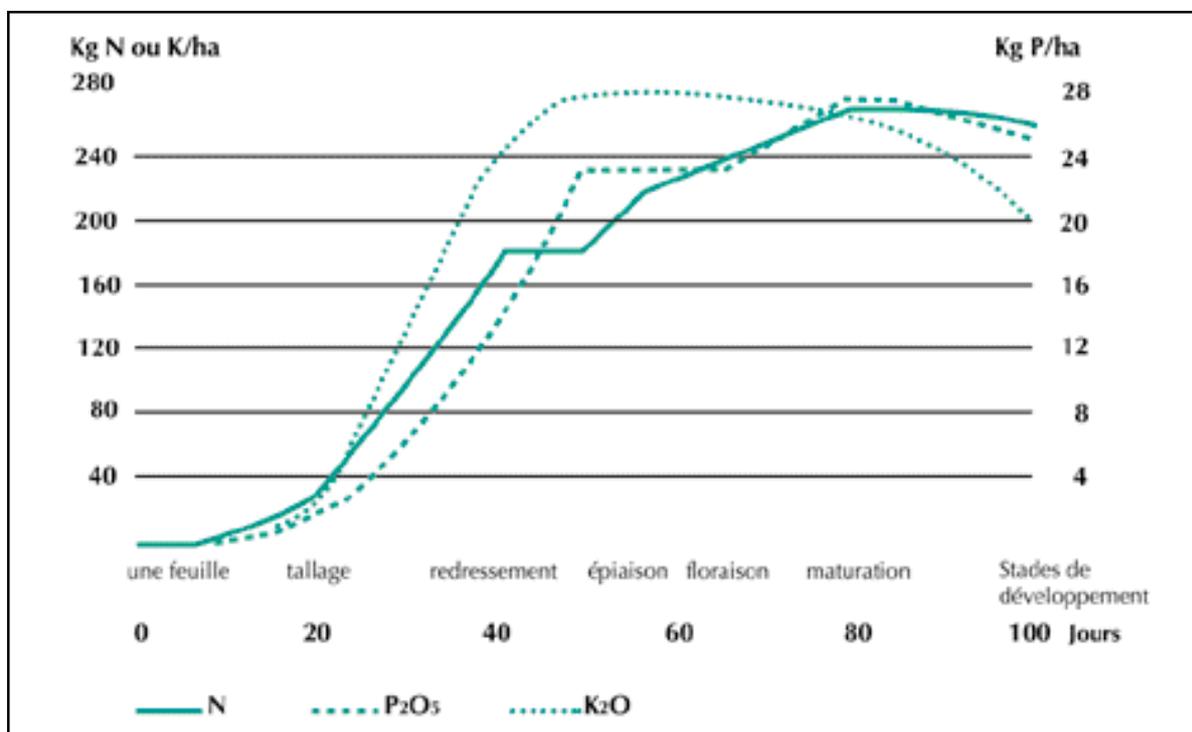


Figure 2 - Prélèvements des principaux éléments nutritifs par du blé

---

• **ses besoins instantanés.** Les prélèvements de ces quantités totales d'éléments minéraux ne sont pas constants au cours du cycle végétatif.

Il existe des périodes où les besoins instantanés sont très importants, par exemple sur céréales, au cours de la période redressement - floraison (figure 2).

A titre d'exemple, pour  $P_2O_5$ , les besoins "de pointe" peuvent atteindre, par hectare et par jour :

- 2 kg pour le blé, entre la montaison et la floraison,
- 3 kg pour le maïs, à la floraison mâle,
- 3 à 4 kg pour le colza, en mars-avril, alors que la solution du sol ne contient que quelques centaines de grammes de  $P_2O_5$  à l'hectare.

La non-satisfaction de ces besoins instantanés à partir de la solution du sol risque d'entraîner des diminutions notables de rendement. C'est ainsi que l'on explique les résultats parfois spectaculaires du  $P_2O_5$  soluble-eau apporté avant un stade de besoins intenses.

Le développement optimal des plantes est donc lié à la satisfaction de leurs besoins totaux et instantanés (exigence des cultures).

Le rôle de la fertilisation est d'éviter les insuffisances, globales et instantanées, qui pourraient apparaître dans la nutrition des cultures. Pour ceci, elle devra être calculée d'après les exportations, élément de base du bilan, en fonction des pertes par lessivage, par exemple pour CaO et MgO, et des caractéristiques du sol pour l'élément en question, par exemple  $P_2O_5$  (notion de biodisponibilité).

Les engrais minéraux apportés aux terres sont destinés à être dissous, car les racelles les absorbent sous forme de solutions salines nutritives. Cela souligne l'importance de l'eau, véhicule des éléments nutritifs dissous nécessaires aux cultures.

Dans une certaine mesure, les feuilles peuvent participer à l'alimentation minérale du végétal ; cette propriété est parfois utilisée pour lutter contre des carences en oligo-éléments, magnésium ou autres éléments par des pulvérisations foliaires de sels en solution. Toutefois, la fumure foliaire ne peut être qu'un complément pour les éléments majeurs et secondaires.



*Le maïs a des besoins nutritifs particulièrement élevés lors de la floraison mâle*

---

## 5 EQUILIBRE PHOTOSYNTHESE-ALIMENTATION MINERALE

Pour que la photosynthèse et le développement de la plante puissent s'effectuer dans de bonnes conditions, il est souhaitable que soit réalisé dans l'alimentation un certain équilibre entre le carbone fixé dans les feuilles (formation des glucides) et les éléments minéraux absorbés par les racines. L'activité des racines et des feuilles doit se poursuivre harmonieusement, sinon des accidents peuvent survenir (verse, échaudage...) et les rendements s'en trouvent réduits.

La pleine efficacité de la fertilisation minérale intensive nécessite une assimilation chlorophyllienne optimale : tout doit donc être mis en oeuvre pour que les cultures reçoivent et utilisent au maximum l'énergie solaire disponible : densité de semis, placement des graines, choix des variétés, désherbage, lutte contre les parasites et les maladies...

Le rapport entre la valeur énergétique des récoltes et l'énergie solaire reçue, qui était de 0,25 % au Moyen-Age, atteint

aujourd'hui 1,5 %, le maximum se situant aux environs de 4 %. Cet accroissement est le résultat de l'amélioration de l'ensemble des techniques culturales, en particulier des techniques de fertilisation minérale.

## 6 CONCLUSION

La plante puise les éléments nécessaires à son alimentation dans l'air et dans le sol.

Soumise aux facteurs climatiques (insolation, température, pluviosité, etc.), la plante joue un rôle essentiel dans l'épuration de l'atmosphère. Elle y prélève le gaz carbonique nécessaire à la synthèse de ses tissus et y rejette de l'oxygène.

Elle est également sous la dépendance étroite des propriétés physiques et chimiques du sol, que de bonnes pratiques culturales et une fertilisation bien conduite permettent d'améliorer.



*Une fertilisation minérale équilibrée et bien conduite contribue à l'augmentation constante des rendements en blé.*

# Lois Générales de la Fertilisation

La fertilisation a pour but essentiel de maintenir ou d'accroître la richesse d'une terre en éléments organiques et minéraux, notamment en azote, anhydride phosphorique et potasse, de telle manière que les imperfections du sol dues à la nature de la roche mère, au climat ou au passé cultural soient corrigées dans le sens d'un équilibre adapté aux exigences des cultures et aux potentialités locales.

Les principes de la fertilisation découlent de trois lois fondamentales :

## 1 LOI DE RESTITUTION, OU DES AVANCES

A la notion de "restitution", il est préférable de substituer celle d'"avance", en recherchant une alimentation optimale des cultures.

Cette loi fondamentale intéresse, dans le cadre de la rotation des cultures, l'aspect statique du maintien de la fertilité.

Les exportations d'éléments minéraux par les récoltes doivent être compensées par des restitutions pour éviter l'épuisement du sol.

Cette règle est insuffisante car :

- de nombreux sols souffrent d'une pauvreté naturelle en un ou plusieurs éléments nutritifs, et nécessitent l'apport d'une fumure dite "renforcée", préliminaire indispensable à toute mise en valeur intensive.

Il en existe d'autres qui exigent d'être suffisamment enrichis en matière organique ou en calcium pour pouvoir répondre à la définition de sol cultivé.

- le sol est exposé à des pertes d'éléments fertilisants par entraînement dans les eaux de drainage et vers la nappe souterraine. Ces pertes sont très faibles pour  $P_2O_5$  (moins de 1 kg par ha et par an), faible pour  $K_2O$ . Pour N,  $SO_3$  et MgO, elles peuvent atteindre quelques dizaines de kilos par hectare et par an et même plusieurs centaines pour CaO.

Il faut également tenir compte de pertes possibles dans

les eaux de ruissellement et par érosion ; ainsi, certaines pentes dénudées peuvent perdre plusieurs kilos de  $P_2O_5$  par hectare et par an et d'importantes quantités de matière organique.

- les plantes manifestent des besoins intenses en éléments nutritifs ou "besoins instantanés", au cours de certaines périodes de leur cycle végétatif, durant lesquelles les réserves mobilisables du sol peuvent être insuffisantes (azote au tallage et à la montaison des céréales d'hiver, anhydride phosphorique au démarrage des cultures de printemps).

Pour ces raisons, la détermination de la fumure basée uniquement sur la règle des exportations ne saurait convenir. Elle permet toutefois une approche globale qui doit être corrigée en tenant compte de la richesse du sol, des pertes diverses et des besoins "de pointe" au cours du cycle végétatif (exigence des cultures).



*Le blé a des besoins en azote très importants à partir de la montaison.*

### 3 LOI DES ACCROISSEMENTS MOINS QUE PROPORTIONNELS (Loi de Mitscherlich)

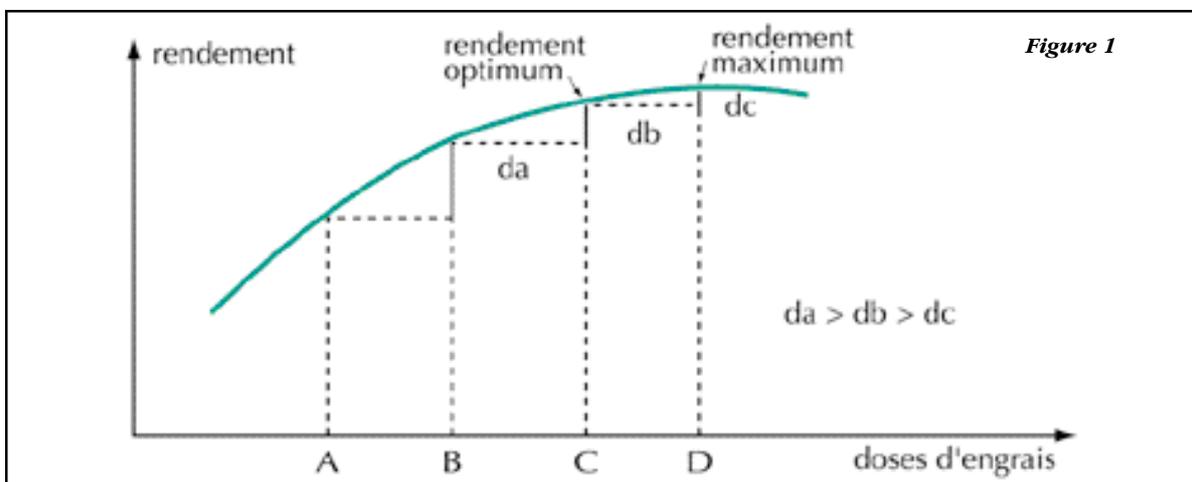
Quant on apporte au sol des doses croissantes d'un élément fertilisant, les augmentations de rendement obtenues sont de plus en plus faibles au fur et à mesure que les quantités apportées s'élèvent.

Cette loi se traduit par une courbe dont le sommet représente le rendement maximum possible. Mais, auparavant, on atteint un niveau de rendement où le supplément de récolte obtenu couvre

juste la dépense supplémentaire en engrais : le rendement optimum est atteint (figure 1).

Au delà de la dose d'engrais C, la valeur du supplément de récolte obtenu ne paie pas la valeur du supplément d'engrais utilisé.

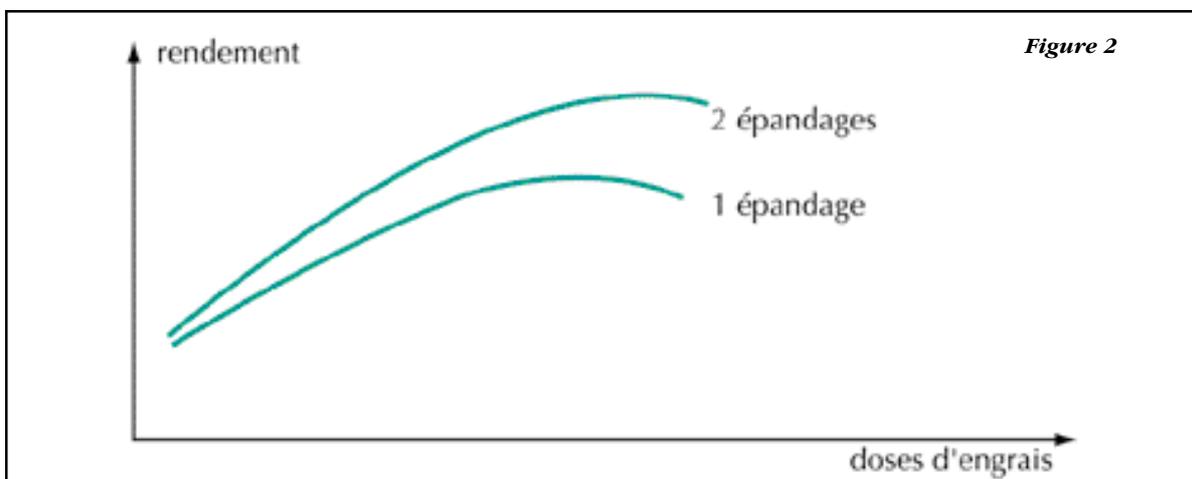
La valeur de  $d_c$  (supplément de récolte) est inférieure à la valeur de la quantité d'engrais supplémentaire (D-C).



Dans cette notion de rendement optimum, il convient souvent de faire intervenir la date et la qualité de la récolte qui influent sur le montant du produit brut.

Le mode d'apport des éléments fertilisants peut modifier

l'allure de la courbe. Ainsi, dans la plupart des cas, l'apport d'azote en deux fois sur blé (tallage et montaison) donne de meilleurs résultats que l'apport en une seule fois, à égalité de doses d'emploi (figure 2), tout en permettant une meilleure protection de l'environnement.





*Blé en fin de tallage ; bon stade pour faire le 2<sup>e</sup> apport d'azote*

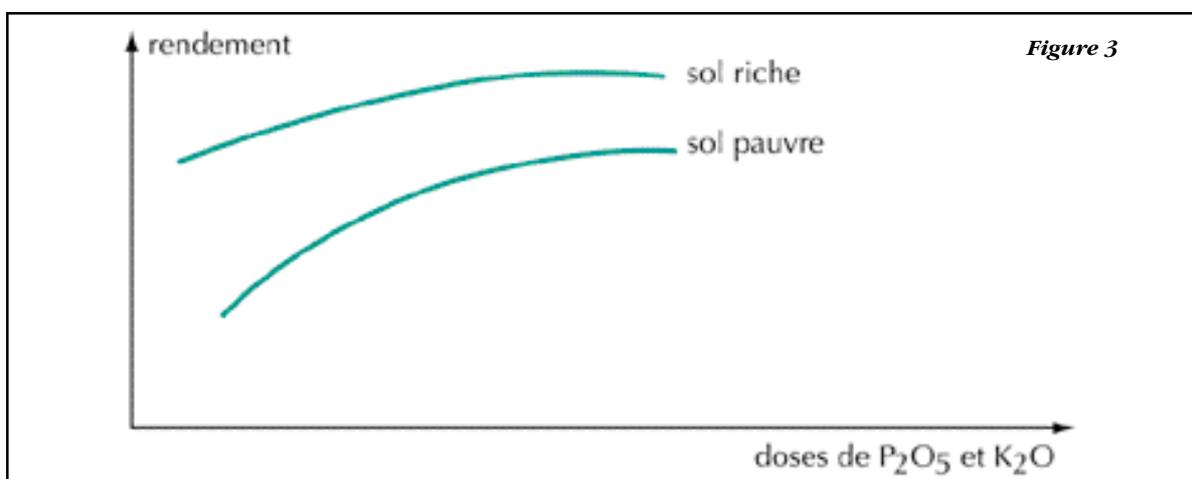
De même, le fractionnement de la fumure phosphatée (automne-printemps) sur prairies se traduit fréquemment par un enrichissement de la teneur en phosphore du fourrage, même sans augmentation de rendement.

Cet exemple montre qu'il est nécessaire de tenir compte à la fois du rendement et de la valeur nutritionnelle ou technologique du produit récolté.

Dans le but de rechercher la meilleure efficacité de la fumure, il faut donc ajouter à la notion de "quantités d'éléments fertilisants apportés" celle de "conduite de la fertilisation".

Pour  $P_2O_5$  et  $K_2O$ , la loi de Mitscherlich ne s'applique que dans le cas des sols pauvres en ces éléments. En sols bien pourvus, il ne s'agit plus de déterminer la fumure en fonction d'augmentations de rendement très difficiles à obtenir, mais d'entretenir la fertilité acquise pour maintenir le niveau d'alimentation optimale. La figure 3 montre que les réserves constituées grâce aux reliquats d'engrais accumulés peuvent éventuellement exercer un effet supérieur à l'effet maximum obtenu avec des engrais récemment appliqués en l'absence de ces réserves.

Pour  $P_2O_5$ , cet effet ne se manifeste pas toujours dans les sols à fort pouvoir fixateur vis-à-vis de P.



### 3 LOI DU MINIMUM OU D'INTERACTION

“L'importance du rendement d'une récolte est déterminée par l'élément qui se trouve en plus faible quantité par rapport aux besoins de la culture” (Liebig 1803-1873).

Cette loi du minimum est souvent illustrée par la vieille image de la douelle de barrique : le contenu de la barrique ne peut dépasser le niveau de la douelle la plus basse.

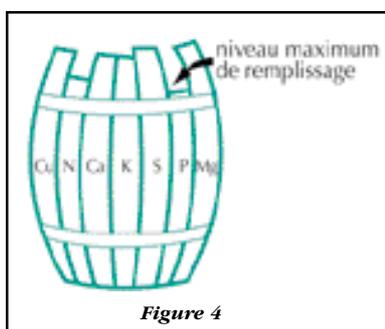


Figure 4

Dans un sol déséquilibré en éléments minéraux, le rendement de la culture est limité au niveau permis par l'élément présent en plus faible quantité, même si tous les autres se trouvent en quantités suffisantes.

L'analyse de terre permet généralement de découvrir ce facteur limitant.

Un corollaire de cette “loi du minimum” s'applique à l'agriculture d'aujourd'hui : “chaque facteur de production est d'autant plus efficace que les autres sont plus près de leur optimum”.

Cette loi a eu le grand mérite de mettre en évidence l'interdépendance entre les divers éléments fertilisants et la nécessité d'atteindre une richesse suffisante du sol en tous éléments pour que le rendement optimum soit atteint.

Dans les sols convenablement fertilisés depuis plusieurs décennies, la “loi d'interaction” consacre l'interdépendance des éléments fertilisants.

Il s'avère en effet bien souvent illusoire d'étudier isolément chaque facteur de production. Tout au contraire, chacun d'eux doit être considéré comme partie d'un ensemble à l'intérieur duquel il est lié aux autres par des effets réciproques.

Lorsque l'effet exercé par un ensemble de deux facteurs est supérieur à la somme des effets de ces facteurs agissant séparément, on dit qu'ils sont liés par une interaction positive, encore appelée synergie ; dans le cas contraire, il s'agit d'une interaction négative. Ces interactions peuvent porter sur le rendement et la qualité des récoltes.

De nombreuses expériences ont souvent mis en évidence des interactions positives entre N et  $P_2O_5$ , N et  $K_2O$ ...

De telles interactions existent entre tous les facteurs de production : N et l'irrigation, N et le désherbage, N et les fongicides, fertilisation et structure du sol...

En ce qui concerne les éléments fertilisants, une interaction est également susceptible d'apparaître :

- dans le sol : certaines formes d'éléments facilitent la mobilisation d'un autre-élément ; ainsi le sulfate et le nitrate d'ammonium favorisent la solubilisation du  $P_2O_5$  en sols alcalins.
- dans la nutrition minérale du végétal ; ainsi, l'absorption d'une partie de l'azote sous forme de  $NH_4$  favorise le prélèvement de  $P_2O_5$  par le végétal.

### EXEMPLE D'INTERACTION

Deux niveaux de fumure azotée (60 et 120 N/ha) et deux de fumure phosphatée (50 et 100  $P_2O_5$ /ha) permettent d'obtenir les résultats suivants en q/ha de maïs grain (figure 5).

Par rapport au témoin 60 N - 50  $P_2O_5$ , ayant donné 55 q/ha

- l'effet de 120 N seul donne + 12 q/ha,
- l'effet de 100  $P_2O_5$  seul donne + 3 q/ha,
- et l'effet conjoint de 120 N et 100  $P_2O_5$  donne + 20 q, soit une valeur supplémentaire de 5 q/ha, à mettre au compte de l'interaction N - P.

$P_2O_5$ /ha \ N/ha	60	120
50	55 q	67 q
100	58 q	75 q

Les effets d'interaction positive, moins marqués pour de hauts niveaux de fertilisation, ont une importance sensible pour les niveaux de fumure usuels dans de nombreuses situations.

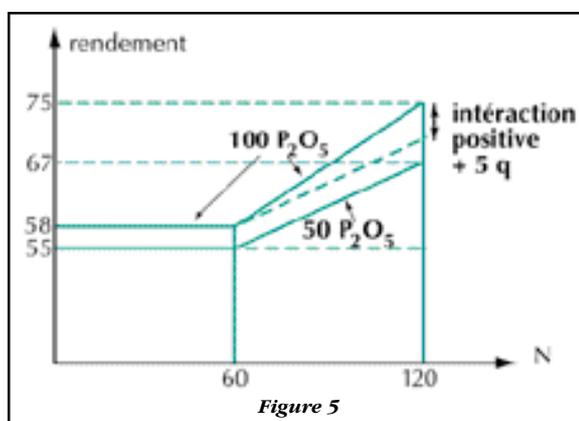


Figure 5

# L'Humus

## 1 MATIÈRE ORGANIQUE ET HUMUS

La matière organique provient surtout de la transformation des résidus végétaux (les débris animaux ne représentant qu'une source très secondaire). Elle ne comprend pas les êtres vivants.

Les apports organiques donnent naissance à deux groupes distincts :

- les substances organiques libres, non liées aux particules du sol, pauvres en azote, correspondant aux débris végétaux,
- les matières organiques liées à l'argile ou humus stable, qui constituent la fraction la plus abondante (constituants biologiques ou humifiés).

### RÔLES DE L'HUMUS

L'humus augmente la capacité de production d'un sol en agissant sur :

- **ses propriétés physiques et chimiques**
  - ◇ effet favorable sur la stabilité des agrégats, et sur la structure du sol,

- ◇ accroissement de la capacité de rétention en eau,
- ◇ augmentation de la capacité d'échange cationique CEC.

- **son activité biologique**

- ◇ stimulation de l'activité des micro-organismes.

- **les conditions de nutrition des plantes**

- ◇ amélioration de l'exploration racinaire due à une bonne structure du sol,
- ◇ libération d'azote nitrique (cf. chapitre "Fertilisation azotée") et des éléments minéraux que le sol renferme,
- ◇ maintien du phosphore à l'état assimilable grâce à la formation d'humophosphates,
- ◇ absorption plus facile des éléments fertilisants à travers les membranes des racelles, favorisant l'action des engrais minéraux.

- **la croissance des végétaux**

- ◇ action stimulante des hormones, vitamines et substances de croissance de l'humus sur les végétaux supérieurs.

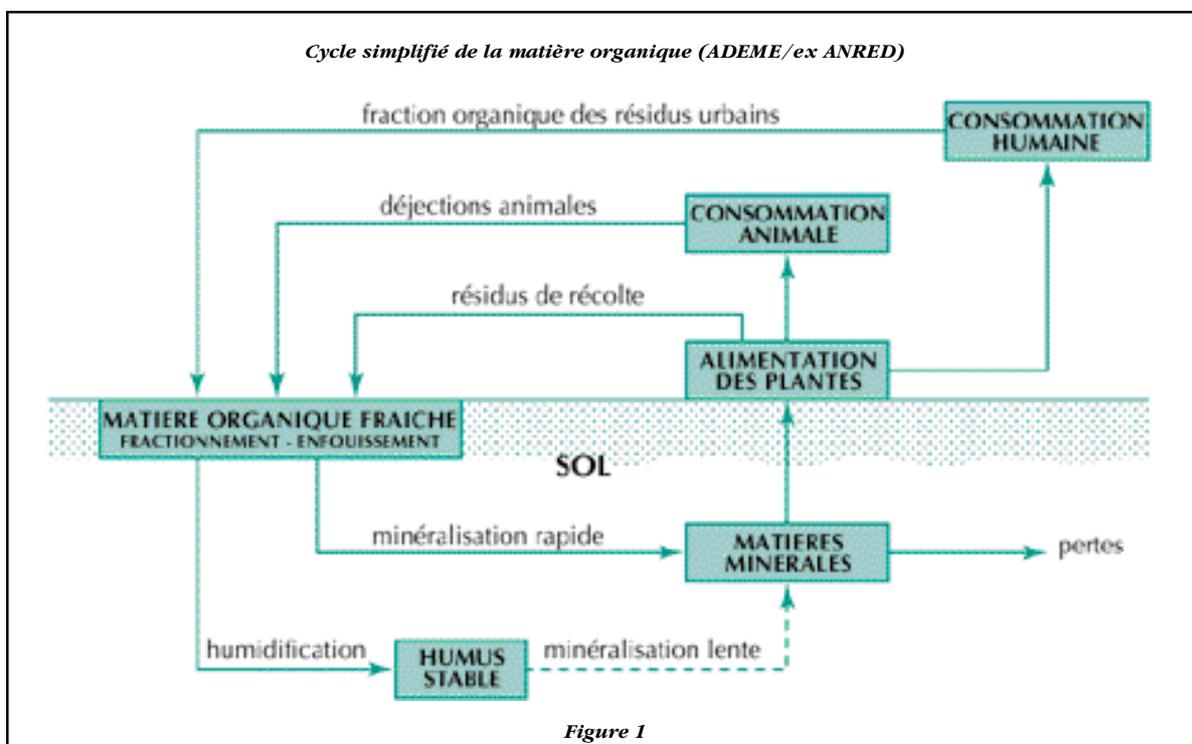


Figure 1

### **FORMATION ET MINERALISATION DE L'HUMUS**

La quantité d'humus stable que l'on peut espérer obtenir à partir d'apports organiques dépend de leur teneur en matière sèche et de leur richesse en cellulose et en lignine.

Le coefficient isohumique  $K_1$  désigne la quantité d'humus stable formée par kilogramme de matière sèche (M.S.) apportée au sol.

On peut retenir pour  $K_1$  les valeurs suivantes :

	M.S. en %	$K_1$
Fumier (moyennement décomposé)	20	0,4 à 0,5
Pailles	85	0,1 à 0,15
Résidus de plantes annuelles	85	0,20
Engrais verts + CIPN*	20	0

\* CIPN : Cultures intermédiaires pièges à nitrates.

30 tonnes de fumier à 20 % de matière sèche donneront donc 2,5 à 3 tonnes d'humus.



*L'emploi du fumier permet un bon entretien humique des sols.*

Les engrais verts, pauvres en lignine, n'apportent que de très faibles quantités d'humus.

Le coefficient de minéralisation  $K_2$  rend compte de la quantité d'humus détruite chaque année. En France,  $K_2$  se situe en moyenne entre 0,8 et 2 % ; il dépend des conditions pédoclimatiques, mais augmente en présence de fortes restitutions humiques.

Cette perte annuelle, généralement comprise entre 800 et 1400 kg par hectare, entraîne une libération d'azote variant en général de 40 à 80 kg.



*Le brûlage des résidus de récolte est une perte de matière organique.*

## 2 BILAN DE L'HUMUS SUR L'EXPLOITATION

Il est difficile de l'établir avec exactitude en raison de l'imprécision des données.

### • Les pertes

Elles sont fonction entre autres de la structure et du pH du sol, de la profondeur du labour et de l'importance des restitutions organiques. Elles peuvent varier presque du simple au double.

### • Les gains

◇ le **fumier** de ferme est une source importante d'humus par l'apport des déchets végétaux qu'il contient. Il dose en moyenne 5 ‰ de N, 3 ‰ de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 6 ‰ de K<sub>2</sub>O et contient des traces d'autres éléments minéraux, mais il ne restitue qu'une partie des éléments fertilisants prélevés par les récoltes. Le fumier, épandu à l'automne avant la tête de rotation, doit être enfoui aussitôt pour diminuer les pertes d'azote par volatilisation. Les épandages de printemps limitent les risques de lessivage.

◇ le **purin** n'enrichit pas le sol en humus, car il n'apporte pas de matière carbonée. Titrant en moyenne 3 ‰ de N, 0,7 ‰ de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et 5,5 ‰ de K<sub>2</sub>O (purin pur de bovins), il est déséquilibré en phosphore. Il est surtout utilisé sur prairies, mais l'excès conduit à la dégradation de la flore.

◇ les **lisiers**, mélanges de déjections solides et liquides, avec ou sans litière, ont un rôle réduit sur l'entretien humique du sol. Leur composition est très variable selon les types d'animaux, leur alimentation, la dilution plus ou moins grande du produit, etc.

Lisier	N ‰	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ‰	K <sub>2</sub> O ‰
	Teneurs moyennes - très grande variabilité		
vaches laitières	5	2,5	6
porcins	5	4	3
poules pondeuses	10	10	7

Purins et lisiers ont surtout un rôle sur la fertilité chimique des sols ; leurs compositions très variables imposent des analyses pour bien raisonner leur emploi qui doit également tenir compte des règlements en vigueur pour le respect de l'environnement.

D'ailleurs, comme les engrais minéraux, leur utilisation raisonnée fait partie des bonnes pratiques agricoles nécessaires au respect de l'environnement ; aussi, ces produits (fumiers, purins, lisiers) font-ils l'objet de plusieurs chapitres du code de bonnes pratiques du CORPEN\* (cf. chapitre XIII), tant en ce qui concerne leur collecte et stockage que leur valorisation en tant que fumure organique et minérale.

\* CORPEN : Comité d'Orientation pour la Réduction de la Pollution des Eaux par les Nitrates, les phosphates et les produits phytosanitaires provenant d'activités agricoles.



*Enfouissement d'engrais vert*

◇ les **résidus de récolte**, déchets laissés par la culture sous forme de feuilles, chaumes, racines, apportent en moyenne 400 à 700 kg d'humus par hectare et par an.

◇ les **pailles** enfouies contribuent pour une bonne part au maintien du stock d'humus du sol. Une tonne de paille donne 100 à 150 kg d'humus. Pour décomposer les pailles, qui sont riches en cellulose et pauvres en azote (rapport C/N de 80 à 100), les microbes doivent prélever dans le sol l'azote minéral nécessaire à la formation de l'humus dont le rapport C/N est voisin de 10. Dans les sols où un effet dépressif est constaté sur la culture suivante, il peut être bon d'épandre 6 à 12 kg d'azote (N) par tonne de paille, dont il sera tenu compte dans le bilan de l'azote. Il peut aussi être judicieux de laisser les microbes fixer, en fin d'été, l'azote nitrique susceptible d'être lessivé en hiver, et de renforcer la dose d'azote au printemps suivant.

◇ les **engrais verts** et les "cultures intermédiaires pièges à nitrates" (C.I.P.N.) fournissent une quantité d'humus stable négligeable. Ils ont une action intense mais fugace sur la structure et remontent dans la couche arable, sous une forme assimilable, les éléments P et K prélevés dans le profil du sol.

Les C.I.P.N. ne jouent véritablement leur rôle que si la masse végétative est suffisamment importante lors de l'enfouissement, soit au moins 1 tonne de matière sèche par hectare.

Ces pratiques sont aléatoires dans les régions exposées à la sécheresse, car elles peuvent réduire les réserves en eau disponibles pour la culture principale qui suivra.

◇ les **prairies temporaires ou naturelles** contribuent efficacement à l'entretien du stock d'humus : 900 kg par hectare pour une prairie temporaire de 3 ans, 15 à 20 t par hectare pour une prairie de 30-50 ans.

◇ les **amendements organiques** ne provenant pas de l'exploitation : lorsque le bilan est déficitaire avec l'emploi des seuls produits de l'exploitation, il est possible de faire appel à des amendements organiques extérieurs.

### 3 LES AMENDEMENTS ORGANIQUES EXTERIEURS A L'EXPLOITATION

On peut se les procurer auprès des distributeurs en culture ; il faut s'assurer qu'ils sont mis sur le marché conformément à la réglementation en vigueur (voir chapitre 10, partie 4. Législation : aspects pratiques).

La plupart d'entre eux sont normalisés et relèvent de la norme NF U 44-051 de décembre 1981 « Amendements organiques - Dénominations et spécifications » ; citons à titre d'exemple :

- Les **tourbes et composts de tourbe** qui sont essentiellement destinés à améliorer les qualités physiques des sols à vocation particulière : serres, maraîchage de plein champ, gazons, etc.

Ils sont employés à doses de 50 à 100 m<sup>3</sup>/ha et allègent les terres argileuses, donnent de la cohésion aux sols sableux, réduisent les phénomènes de battance, et augmentent fortement la capacité de rétention en eau.

Leur capacité d'échange élevée permet une bonne valorisation des engrais apportés.

- Les **composts urbains** qui ont une teneur variable, exprimée en % de M.S., de l'ordre de 1 pour N, 0,7 pour P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et 0,4 à 0,8 pour K<sub>2</sub>O.

Ils sont intéressants si leur prix de revient, transport compris, n'est pas trop élevé, et s'ils ne contiennent pas trop de résidus indésirables.

Les **amendements organiques avec engrais** relèvent d'une autre norme, la NF U 44-071 de décembre 1981. Ce sont des amendements enrichis en éléments minéraux N, P, K, etc.

Ils sont surtout utilisés en viticulture, arboriculture, sur les cultures maraîchères et florales.

### 4 AUTRES SOURCES DE MATIERES ORGANIQUES EXTERIEURES

Citons par exemple les boues résiduaires des stations d'épuration des eaux qui ont une teneur en matière sèche de 2 à 4 % (boues liquides), 6 à 8 % (boues préconcentrées), 15 à 30 % (boues pâteuses), 30 à 50 % (boues solides).

Leur teneur en éléments fertilisants, en % de la M.S., est en moyenne de 3 N, 3 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 1 K<sub>2</sub>O, 5 à 30 CaO. Leur taux de matière organique est situé généralement entre 30 et 60 % de la matière sèche, avec des rapports C/N variant de 8 à 20.

Certains de ces produits ont une valeur fertilisante intéressante : de 2 à 10 % en N, 3 à 6 % en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, exprimés en % de la M.S., et des traces de K<sub>2</sub>O.

Mais ils peuvent poser des problèmes dus à la présence de quantités excessives de métaux toxiques (plomb, zinc, chrome, cadmium,...), de germes pathogènes et de micropolluants organiques.

La valorisation agricole des boues est donc régie par une réglementation (normes de production des sols, règlement sanitaire départemental, etc.) qui s'appuie notamment sur la norme NF U 44-041 de juillet 1985. Cette norme ne concerne que les boues des ouvrages de traitement des eaux usées urbaines, mais sert de référence réglementaire pour d'autres catégories de boues.

Rappelons que des produits à base de boues peuvent être valorisés et mis sur le marché après obtention d'une homologation ou d'une autorisation provisoire de vente.

### 5 CONCLUSION

Il est nécessaire d'établir un bilan, au moins approximatif, de l'humus au cours d'une rotation. Il est en effet presque toujours possible de choisir une succession de cultures apte à maintenir le taux d'humus du sol grâce à l'enfouissement des résidus de récolte. Ceux-ci augmentent avec les rendements, eux-mêmes sous la dépendance de la fertilisation minérale.

**En même temps qu'ils nourrissent les plantes, les engrais minéraux sont générateurs d'humus et développent ainsi le cycle de la fertilité.**



*Le lisier a un rôle réduit pour l'entretien humique des sols.*

# Calcium - Magnésium

## 1 CALCIUM

### RÔLES DU CALCIUM

Principalement actif sous forme de carbonate,  $\text{Ca}^{2+}$  est un **aliment** pour les plantes qui contiennent de 0,14 à 45 %  $\text{CaO}$  ( $\text{CaO} = 1,4 \text{ Ca}$ ), selon l'espèce, la nature des organes, l'âge ; les graines, fruits, racines et tubercules sont moins riches en Ca que les feuilles. La teneur en calcium des feuilles augmente avec leur âge.

Il est exceptionnel que le sol n'assure pas une **alimentation** calcique convenable à la plante, car même les terrains très pauvres contiennent des quantités suffisantes pour assurer les besoins alimentaires des plantes, compris entre 25 et 100 kg de calcium par hectare.

Mais le calcium intervient surtout sur le pH (cf. chapitre I) et l'efficacité du complexe argilo-humique du sol : c'est son rôle, essentiel, d'**amendement**. Il agit favorablement sur :

- la stabilité structurale, permettant une granulation stable des particules, propre à faciliter le passage de l'air et de l'eau et la pénétration des racines.
- le pH, dont l'optimum se situe généralement vers 6,5 (et même 7,5 en sols argilo-limoneux des plateaux). Les pH supérieurs à 8,0 sont généralement défavorables à la vigne et à certains arbres fruitiers comme le poirier, ou à certaines plantes annuelles (soja, sorgho, lupin) par excès de calcaire actif entraînant la chlorose ferriprive.
- l'activité des micro-organismes des terres acides.
- la disponibilité du sol en certains éléments minéraux, car il favorise la mobilité du  $\text{K}^+$  et maintient les ions  $\text{PO}_4^{3-}$  sous des formes assimilables.

**La pleine efficacité des fumures minérales ne s'obtient que sur des terres en bon état calcique.**

### LE BESOIN EN CHAUX

Il est déterminé au laboratoire par la mesure du pH et du taux de saturation de la C.E.C. (capacité d'échange cationique) - cf. chapitre I, paragraphe 3. Il est calculé en tenant compte des quantités de calcium nécessaires soit au maintien des propriétés physiques du sol (supérieures à celles nécessaires à l'obtention du pH eau de 6), soit au maintien d'une activité biologique satisfaisante du sol (égales à celles nécessaires à l'obtention d'un pH eau de 6)

Une terre en état de bonne productivité doit contenir environ 3 % de  $\text{CaO}$  échangeable si elle est sableuse, 2 à 3 fois plus si elle est argileuse ou humifère (fonction de la C.E.C.).

Si l'analyse ou certains indices visibles (mauvaise structure, décomposition trop lente des apports organiques, implantation difficile de la luzerne) révèlent un manque de chaux, on procède à un relèvement progressif du pH.

Pour éviter un blocage d'oligo-éléments, qui sont pour la plupart (sauf le molybdène) moins assimilables par les plantes en milieu très alcalin, il est préférable de faire des apports modérés d'amendements calcaires, mais répétés tous les 3 à 5 ans.

Des chaulages d'entretien, relevant chaque fois le pH d'un quart ou d'une demi-unité, devraient devenir la règle.

Pour relever le pH d'une demi-unité, il faut en moyenne les quantités/ha d'amendements suivantes :

	Chaux vive	Calcaire (50% CaO)
terres sableuses	400 à 1000 kg	800 à 2000 kg
limons	800 à 2000 kg	1700 à 4400 kg
terres argileuses ou humifères	1300 à 3400 kg	2600 à 6800 kg

### LES PERTES EN CHAUX. Elles sont dues:

- **au caractère acidifiant des engrais** : 100 kg de 17-17-17 entraînent une perte de 21 kg  $\text{CaO}$ , 100 kg d'ammonitrate de 33 kg  $\text{CaO}$ , et 100 kg d'urée de 46 kg  $\text{CaO}$ .
- **au prélèvement par les récoltes**

Pertes de $\text{CaO}$ en kg/ha	
céréales .....	40-50
betterave, pomme de terre .....	90-120
luzerne .....	250-300
maïs ensilage .....	50
graminées fourragères .....	60

- **à l'entraînement par les eaux de pluie**

$\text{Ca}^{2+}$  est facilement entraîné par les eaux de pluie chargées de gaz carbonique et de soufre.

Au total, ces pertes varient en culture intensive de 400 à 800 kg  $\text{CaO}$ , ou unités équivalentes  $\text{CaO}$  (valeur neutralisante) : cf. paragraphe 3 du chapitre V.

---

## 2 MAGNESIUM

Le magnésium est un élément important qui se retrouve surtout dans les feuilles comme constituant de la chlorophylle. Il contribue au transfert du phosphore vers les graines, participe à la formation et à la mise en oeuvre des sucres, protéines et vitamines. Les prélèvements par les récoltes, accrus par l'intensification et le lessivage, font perdre chaque année au sol de 40 à 60 kg de magnésie (MgO) par hectare (MgO = 1,66 Mg). La magnésie, encore plus sensible que la chaux au lessivage, disparaît d'autant plus vite que le sol est plus drainant. Il est nécessaire d'apporter une attention plus grande que dans le passé à la teneur des sols en magnésie échangeable.

Betterave, luzerne, maïs, tournesol et sorgho sont les plantes annuelles les plus sensibles au manque de magnésium. Sur vergers et sur vignes, des carences peuvent également apparaître. Celles-ci sont dues, soit à la pauvreté du sol en cet élément (sols sableux ou tourbeux, sols acides), soit à des conditions climatiques défavorables, soit parfois à des antagonismes avec le potassium, ou l'aluminium échangeable en sol très acide.

Outre l'emploi d'amendements ou d'engrais magnésiens, il est possible, en cas d'urgence, de faire des pulvérisations foliaires à base de sulfate de magnésie à 1 ou 2% (sel d'Epsom), ou de nitrate de magnésie.

## 3 AMENDEMENTS CALCIQUES ET MAGNESIENS

Constitués principalement d'oxyde ou de carbonate de calcium ou de magnésium, ils sont destinés essentiellement à maintenir ou à élever le pH du sol et à améliorer sa structure. Le calcium et le magnésium contenus dans ces amendements peuvent servir à corriger les déficiences du sol en ces éléments.

L'agriculteur, informé par l'analyse des besoins de son sol, exprimés en CaO, peut recourir à toute une gamme de produits pour effectuer le chaulage. Les amendements calciques et magnésiens sont régis par la norme NF U 44-001 qui distingue cinq classes :



*Epandage d'amendement calcique*

### Classe I

• **Amendements calcaires** (craie, faluns, maërl, tangué, trez, marnes) contenant comme composant essentiel du carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ . Ce sont des produits crus.

### Classe II

• **Amendements calcaires magnésiens et amendements magnésiens**, produits crus d'origine naturelle, contenant du carbonate de magnésium, associé ou non au carbonate de calcium. La dolomie est un carbonate double de  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ .

### Classe III

#### • Chaux

Ce sont les "amendements cuits", comprenant :

- la chaux vive agricole où le calcium est à l'état d'oxyde  $\text{CaO}$ ,
- la chaux éteinte agricole, obtenue après hydratation de la chaux vive,
- la chaux magnésienne vive provenant de la calcination de roches calcaires-magnésiennes,
- la chaux magnésienne éteinte résultant de l'hydratation de la chaux magnésienne vive,
- les déchets ou cendres de chaux calcaires ou magnésiennes, résidus de la fabrication normale des chaux calcaires ou magnésiennes.

### Classe IV

• **Amendements mixtes**, mélanges d'amendements "cuits" et "crus".

### Classe V

• Autres amendements, dont le plus important est constitué par les écumes de défécation de sucreries, résidus de filtration des jus sucrés après carbonatation de ceux-ci par un lait de chaux.

Chaque produit est en outre caractérisé par :

• **sa valeur neutralisante**. C'est la quantité d'oxyde de calcium  $\text{CaO}$  ayant la même capacité de neutralisation que 100 kg du produit considéré. Par exemple, la valeur neutralisante est de 100 pour la chaux pure  $\text{CaO}$ , et de 56 pour le carbonate de calcium pur.

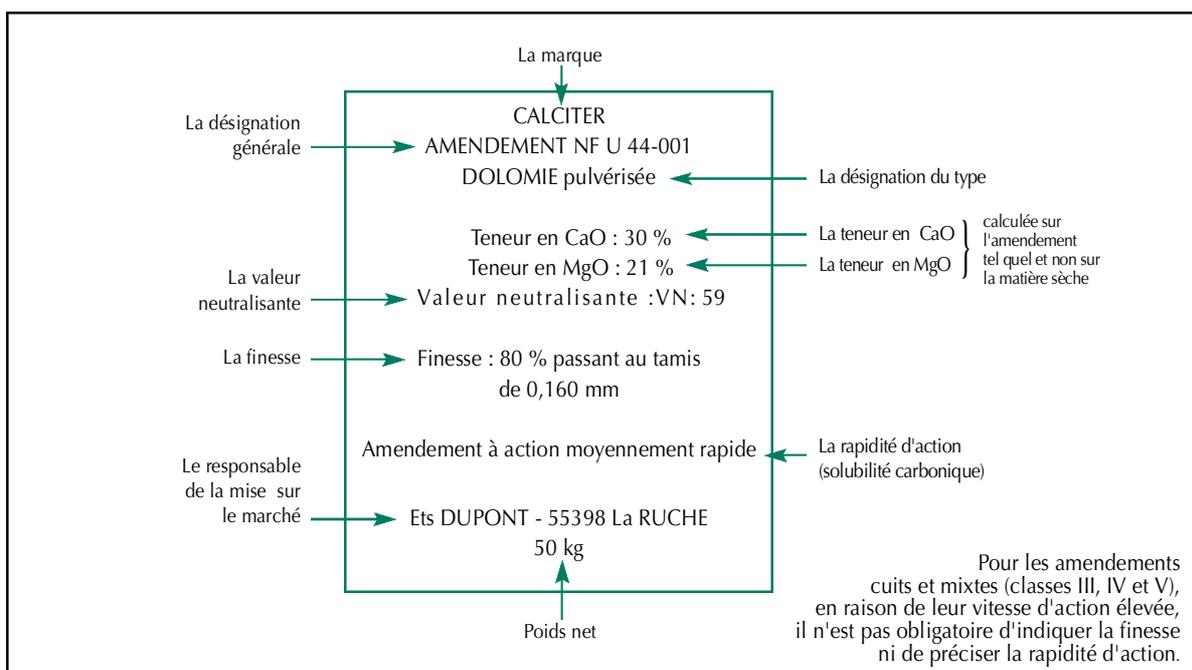
La magnésie a, à poids égal, une plus grande capacité de neutralisation que l'oxyde de calcium : 1 MgO équivaut à 1,4  $\text{CaO}$ . Par exemple, une dolomie contenant 30 %  $\text{CaO}$  et 21 % MgO aura une valeur neutralisante de  $30 + 21 \times 1,4 = 59$ .

• **sa solubilité carbonique**, caractérisant sa rapidité d'action dans le sol. On a ainsi 3 catégories de produits : action rapide (solubilité carbonique  $\geq 50$ ), action moyennement rapide (de 20 à 50), action lente ( $< 20$ ).

• **sa finesse**.

Les amendements sont dits

- pulvérisés si 80% du produit passe au tamis de 0,315 mm et 99 % minimum à 1 mm,



- broyés si 80 % du produit passe à 4 mm,
- concassés ou bruts si leur granulométrie est supérieure à celle des produits broyés.

L'utilisateur peut donc faire appel à une gamme de produits entre lesquels il choisira en fonction de leur teneur en éléments utiles, de leur coût à l'unité, de leur valeur neutralisante et, éventuellement, de leur finesse de mouture et de leur solubilité carbonique.

Certains engrais apportent des quantités de calcium (scories Thomas, cyanamide de chaux) et de magnésium (nitrate de chaux et de magnésie, patentkali, scories Thomas, certains engrais composés...), qui contribuent à l'amélioration des propriétés physiques et chimiques du sol.

#### 4 MATIERES FERTILISANTES MIXTES

Elles ont à la fois une valeur amendante et une valeur fertilisante liée à leur teneur en élément fertilisant.



*Carence magnésienne sur maïs*



*Carence magnésienne sur vigne*

Ce sont :

- Matières fertilisantes mixtes par constitution,
- Amendements calciques, sidérurgiques phosphatés (de 3 à 12% de  $P_2O_5$  total),
- craies phosphatées,
- Matières fertilisantes mixtes par mélange,
- Mélanges d'amendements et d'engrais soumis à une réglementation spécifique et à des normes propres.

# la Fertilisation Azotée

## 1 L'AZOTE ET LA VIE

L'azote joue un rôle essentiel dans la synthèse de la matière vivante à partir de la matière minérale. Dans le protoplasme des cellules, il est combiné avec d'autres éléments fondamentaux pour former les substances organiques azotées, les protéines. Il est un des principaux constituants de la chlorophylle, qui commande l'opération fondamentale de la photosynthèse.

## 2 L'AZOTE DANS LA NATURE

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

- à l'état libre, dans l'air dont il représente les 4/5<sup>e</sup>,
- à l'état combiné, sous la forme minérale (ammoniaque, nitrates) ou organique.

Le règne animal ne peut absorber ni l'azote de l'air, ni directement l'azote minéral. Ce sont les végétaux qui lui fournissent sous forme organique la plus grande part de l'azote dont il a besoin.

## 3 LES SOURCES DE L'ALIMENTATION AZOTÉE DES VÉGÉTAUX

Les plantes ne peuvent pas absorber l'azote de l'air pour la synthèse de leurs tissus.

Seules certaines algues et bactéries sont capables de fixer directement l'azote atmosphérique.

On distingue :

- les bactéries fixatrices se développant dans le sol en milieu anaérobie : *Clostridium pasteurianum*, ou en milieu aérobie : *Azotobacter*.

Le rôle des *Clostridiiums* est faible, celui des *Azotobacters* est limité sous les climats tempérés, plus important dans les pays tropicaux.

- les bactéries fixatrices liées au système racinaire des végétaux : il s'agit du *Rhizobium* des légumineuses, vivant en symbiose avec elles dans les nodosités racinaires. Le *Rhizobium* fixe l'azote de l'air et approvisionne la légumineuse qui fournit à la bactérie, sous forme de glucides, l'énergie dont elle a besoin. L'azote organique stocké dans les nodosités des racines est libéré après leur mort et se transforme progressivement en azote minéral. Les légumineuses contribuent donc, par voie indirecte, à enrichir le sol en azote minéral.

Les végétaux ne sont pas capables d'absorber directement l'azote présent dans le sol sous forme organique.

Exception faite des légumineuses et de rares espèces n'appartenant pas à cette famille, les plantes s'alimentent à partir de l'azote minéral du sol.

Les racines peuvent absorber de faibles quantités d'azote sous forme d'ammoniaque ( $\text{NH}_4^+$ ) ou de nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ).

Ce sont des produits généralement transitoires dans le sol, car l'ammoniaque est oxydé en nitrites et ceux-ci, à leur tour, transformés en nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) par l'activité microbienne du sol.

Ce sont donc essentiellement les nitrates qui assurent la nutrition azotée des plantes.

Les nitrates, très solubles dans l'eau, ne sont pas retenus par le pouvoir adsorbant du sol. Ils suivent l'eau dans ses déplacements et peuvent descendre, par vagues successives, à une vitesse qui dépend de l'état physique du sol et de la quantité d'eau infiltrée (1 cm pour 3 à 8 mm de pluie). Ils peuvent également, s'ils n'ont pas migré à trop grande profondeur, remonter dans le profil du sol par capillarité, en période sèche.

## 4 L'AZOTE DANS LE SOL

### MINÉRALISATION ET REORGANISATION

Les réserves azotées du sol se trouvent à l'état organique sous forme d'**humus** qui contient environ 5% d'azote.

Chaque année, sous climat tempéré, 1 à 2% des réserves d'azote organique passent à l'état nitrique disponible pour la plante : c'est la minéralisation.

Un sol à 4000 tonnes de terre fine contenant 2% d'humus, soit 1% d'azote organique, contient environ 4000 kg d'azote à l'hectare. S'il minéralise au taux de 1 à 2%, il libère 40 à 80 kg d'azote nitrique par hectare et par an. Cette minéralisation intervient quand la température du sol est suffisamment élevée à partir de la fin mars, ou même bien plus tôt suivant les régions et les sols.

Le maïs, la betterave ou le tournesol tireront donc mieux parti de la fourniture d'azote par le sol que le blé ou l'orge d'hiver.

Toutefois, au cours de l'année et surtout durant la période de végétation active, l'azote passe par des alternances de minéralisation et de réorganisation (transformation de l'azote minéral en azote organique) sous l'influence de facteurs climatiques qui conditionnent l'activité bactérienne. L'agriculteur intervient également sur la dynamique de l'azote par les façons culturales qui provoquent l'aération ou au contraire le tassement du sol, et par l'enfouissement des résidus de récolte.

Les conditions climatiques défavorables (forte pluviosité, basses températures), le tassement du sol, l'enfouissement des déchets de récolte entraînent le plus souvent une réorganisation de l'azote.

Inversement, des conditions climatiques favorables, des travaux culturaux permettant d'aérer le sol facilitent le passage de l'azote sous la forme minérale.

L'ampleur des fluctuations de la teneur en azote minéral est liée à l'importance des fumures utilisées, à l'abondance des résidus organiques jeunes et à l'activité biologique du sol.

La teneur en azote total du sol ne permet pas, en général, de déterminer le niveau de fumure minérale convenant à la plante. Un sol peut être riche en azote total parce qu'il a fait l'objet de restitutions organiques importantes, ou parce que ses propriétés physiques freinent le passage de la forme organique à la forme minérale. Par contre, un sol peut être pauvre en azote total parce que les restitutions humiques sont insuffisantes ou parce qu'il libère facilement de l'azote minéral absorbé par les cultures. Dans ce dernier cas, il convient d'équilibrer le bilan humique en enfouissant le maximum de résidus de récolte.

### DENITRIFICATION

Certains microbes anaérobies réduisent les nitrates en différents oxydes d'azote, puis en azote gazeux qui retourne dans l'atmosphère.

Les pertes par dénitrification sont loin d'être négligeables :

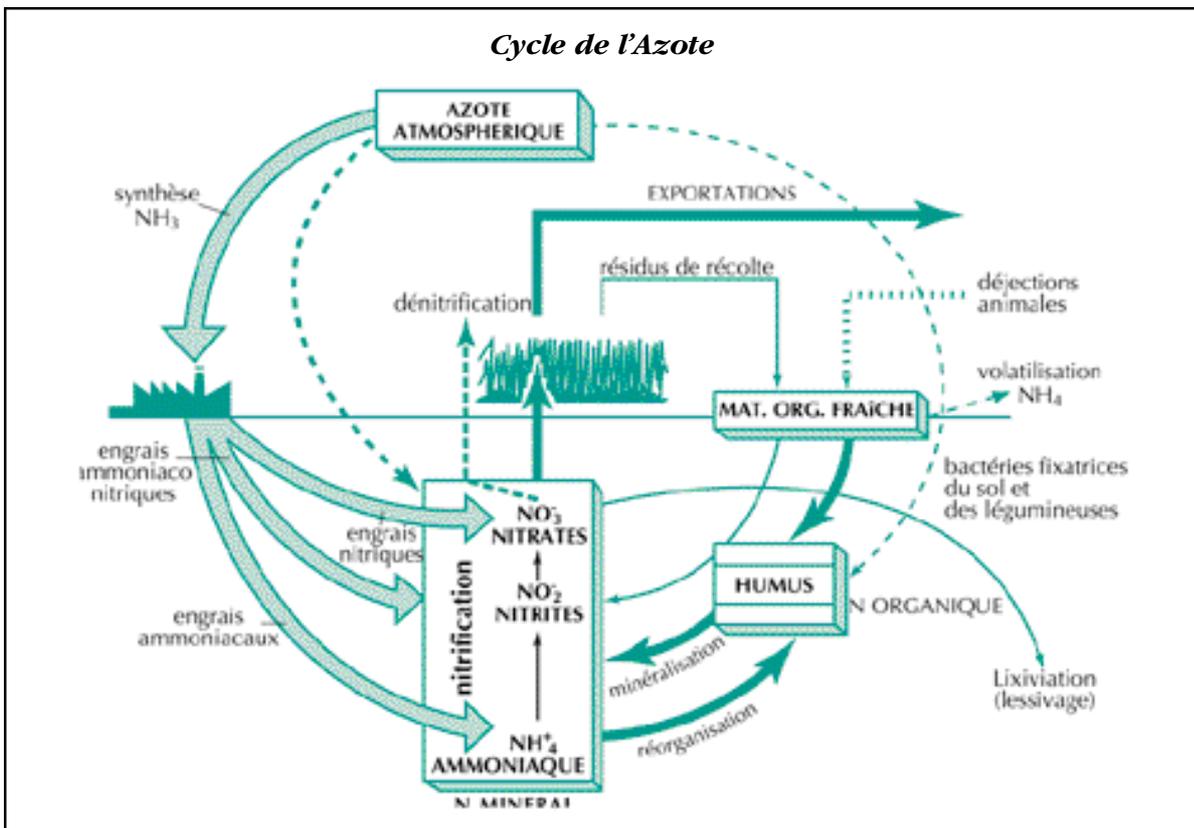
estimées à moins de 10 kg d'azote par hectare et par an, elles peuvent être fortement augmentées par des pratiques culturales ou toute autre cause réduisant l'aération du sol.

Ces phénomènes de minéralisation, réorganisation et dénitrification doivent être pris en compte pour une meilleure gestion de l'azote (cf. chapitre XII).

### VOLATILISATION D'AMMONIAC GAZEUX

Cette volatilisation peut être abondante, surtout dans les sols à pH élevé et en sol sec. Les pertes mesurées se situent entre 0 et 15% selon le type d'engrais, essentiellement lors des apports en surface.

Les chiffres sont beaucoup plus importants avec les effluents d'élevage ou autres résidus organiques. De 10 à 90 % de l'azote ammoniacal contenu dans les fumiers et lisiers épanchés en surface peuvent se volatiliser dans l'atmosphère et participer à la pollution de celle-ci (d'où pluies acides), surtout en régions à forte concentration d'élevages. Leur enfouissement rapide réduit les pertes.



## 5 LA FUMURE AZOTÉE

En une période où les aspects économiques, mais aussi écologiques, sont plus que jamais essentiels, il est nécessaire de bien RAISONNER la fumure azotée, et de l'appliquer au mieux de chaque situation ; il n'y a pas de recettes "passe-partout".

**LE PRINCIPE DU BILAN** doit servir de base au raisonnement de la fumure azotée : il s'agit d'**équilibrer** au mieux les **besoins** de la plante cultivée et les différentes **fournitures** d'azote dont elle peut bénéficier.

• **Les besoins**, c'est à dire les quantités d'azote prélevées dans le sol par la plante, dépendent de :

◇ **l'espèce**: par exemple, par quintal de grain produit, 2kg d'azote pour le maïs, 3 pour le blé tendre, 4,5 pour le tournesol, 6,5 pour le colza...

◇ **la variété**,

◇ **le rendement**. Le bilan prévisionnel sur lequel repose le raisonnement de la fumure azotée devra tenir compte d'un **objectif de rendement** ; celui-ci, que l'on ne confondra jamais avec le rendement "souhaité", sera lui-même raisonné en fonction du **potentiel pédo-climatique** de la petite région ou, mieux, de la parcelle.

**Les caractéristiques du sol** conditionnent le rendement, et peuvent varier d'une parcelle à l'autre. Elles concernent :

- sa nature,
- sa profondeur et sa structure sur tout le profil, dont dépendra l'enracinement, donc l'alimentation et le rendement de la plante,
- son état hydrique et sa maîtrise éventuelle par irrigation ou drainage,
- son état chimique lié à des éléments autres que l'azote (S, P, K, Ca, etc.).

En outre, le rendement potentiel ne sera atteint que si la culture est bien implantée (date de semis, régularité, etc.) et bien protégée contre les maladies et les ravageurs.

**Les conditions climatiques** : plus que les moyennes, ce sont les fréquences des deux principaux phénomènes climatiques (pluviosité, températures) qui seront prises en compte. En pratique, les résultats d'essais obtenus pendant plusieurs années sur des sols comparables, ou la moyenne des cinq meilleurs rendements réalisés sur l'exploitation (ou mieux, sur la parcelle) serviront à fixer l'objectif de rendement, éventuellement corrigé selon l'état de la végétation en cours de cycle.

• **Les fournitures d'azote** ont pour origine :

◇ **Le sol**. Ce sont :

- L'azote minéral, ammoniacal et surtout nitrique, présent dans le sol au départ de la végétation. Cette quantité (reliquat de fin d'hiver) dépend beaucoup des pluies tombées, du lessivage plus ou moins important pendant l'automne et l'hiver.

• L'azote provenant de la minéralisation d'une partie de la matière organique au cours de la période de végétation. Cette quantité varie dans une proportion de 1 à 5 selon :

- les types de sols,
- la culture précédente (espèce, rendement) et sa conduite (fumure azotée, minérale et organique, enfouissement ou non des résidus),
- la durée pendant laquelle coïncident les périodes de végétation et de minéralisation. C'est ainsi que l'azote minéralisé bénéficie mieux aux cultures d'été (maïs, tournesol, betteraves) qu'aux céréales et au colza.

La détermination des fournitures d'azote par le sol constitue, avec la fixation du rendement potentiel, la deuxième grande difficulté du raisonnement de la fumure azotée.

En pratique, on se servira de :

- grilles d'estimation, indiquant les fournitures moyennes par types de sols, régions, précédents culturaux, ou de logiciels,
- résultats de parcelles témoins sans azote, modulés, comme les grilles, selon les conditions climatiques de l'année.

• **Les apports de fertilisants**, organiques et/ou minéraux. La quantité à apporter sera calculée par différence entre les besoins globaux de la plante cultivée et les fournitures d'azote par le sol.

Après la récolte, il restera inévitablement de l'azote disponible dans le sol; cette quantité devra être la plus faible possible pour des raisons à la fois économiques et écologiques.

**L'EQUATION DU BILAN** <sup>(1)</sup> est la suivante :

$$(N_f - N_e) + R_f = R_e + (M_{hb} + M_{ha} + M_{hp} + M_r) + (X + X_a)$$

où (N<sub>f</sub> - N<sub>e</sub>) = Besoin du peuplement végétal entre l'ouverture N<sub>e</sub> et la fermeture N<sub>f</sub> du bilan.

R<sub>f</sub> = Reliquat d'azote minéral à la fermeture du bilan.

R<sub>e</sub> = Reliquat d'azote minéral à l'ouverture du bilan (reliquat hiver pour le blé).

M<sub>hb</sub> = Minéralisation nette de l'humus.

M<sub>ha</sub> = Minéralisation supplémentaire par arrière-effet due à l'apport régulier d'amendements organiques.

M<sub>hp</sub> = Minéralisation supplémentaire due aux retournements de prairies.

M<sub>r</sub> = Minéralisation nette des résidus de récolte.

X = Fumure azotée de synthèse.

X<sub>a</sub> = Fumure azotée sous forme organique: effet direct en équivalent azote minéral.

<sup>(1)</sup> - Se reporter au guide publié par le COMIFER en mai 1996: "Calcul de la fertilisation azotée des cultures annuelles - Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales".

### LES DIFFERENTES ECRITURES

• **L'INRA de Laon** (Hébert et Rémy) applique strictement l'équation ci-dessus. Elle est bien validée sur blé dans les régions de grande culture (Nord/Picardie/Haute Normandie/Beauce, etc.) Elle est appliquée avec le logiciel AZOBIL.

- **Ecriture utilisant le CAU**, dont l'équation s'écrit:

$$Nf = N0 + CAU * (X + Xa)$$

où Nf = azote absorbé par la culture (cf. ci-dessus)

N0 = azote absorbé par la culture et provenant du sol ; sa valeur est estimée pour l'azote absorbé par un témoin To sans azote

CAU = coefficient apparent d'utilisation de l'azote de l'engrais, ou supplément d'azote prélevé par la culture, rapporté à la quantité X d'azote apportée

$$CAU = \frac{Nf - N0}{X + Xa}, \text{ en \%}$$

X + Xa = quantité d'azote de l'engrais (ou équivalent engrais des apports organiques).

Cette approche globale des fournitures du sol est bien adaptée aux sols peu profonds. Elle nécessite d'avoir des références régionalisées pour N0 et le CAU ; c'est actuellement le cas en Aunis et en Lorraine pour les céréales à paille, en Alsace, Lorraine, Poitou-Charentes, Bretagne, Pays de Loire, Centre pour le maïs (AGPM).

- **Autres écritures.**

Elles constituent, pour la plupart, des variantes de l'écriture du principe du bilan.

Citons par exemple celle appliquée sur la betterave sucrière dans le Nord de la France : l'azote absorbé par la culture, pour donner un rendement optimal en sucre à l'hectare, est considéré comme une constante égale à 220 kg N à l'hectare. La fumure à apporter est alors égale à 220 moins le reliquat Re plus les fournitures par le sol. Pour faciliter leur mise en oeuvre, ces différentes écritures sont traduites sous forme de **logiciels de fumure azotée** : AZOBIL (INRA), TOP'AZ (GP), ECOBIL, Bilan AZOTE à l'exploitation, Fumigestion et PIC FUMURE (cf. FNGEDA, août 1992), etc.

Une amélioration de la conduite de la fertilisation azotée est **testée** depuis 1992. Elle combine deux approches:

- dans le sol, détermination de la quantité d'azote que le sol peut potentiellement fournir, soit par application du principe du bilan, soit par appréciation au laboratoire du "pouvoir minéralisateur" du sol,
- dans la plante (le blé), l'appréciation de la quantité de nitrate présente dans le jus de la base des tiges, ce qui permet de voir si l'alimentation azotée est convenable, et dans la négative, de faire un apport supplémentaire (Méthode JUBIL de l'INRA/ITCF et RAMSES de l'UNCAA).

### LES PERIODES D'APPORT - FRACTIONNEMENT

Au cours de son cycle végétatif, la plante doit non seulement trouver une quantité d'azote suffisante pour lui permettre d'atteindre son rendement potentiel, mais il faut aussi que l'azote soit présent et absorbable aux moments voulus :

- il est inutile et dommageable pour l'environnement d'apporter de l'azote quand la plante ne peut pas l'absorber,
- il est nécessaire que l'azote soit au niveau des racines au moment où les besoins de la plante deviennent intenses : par exemple, pour le blé à partir du stade "épis à 1 cm", pour le maïs à partir du stade 6-8 feuilles, pour le colza d'hiver à partir du stade C<sub>2</sub> (entrenoeuds visibles).

Si la dose totale d'azote à apporter est supérieure à 90-100 unités, il sera nécessaire de la fractionner en plusieurs apports, l'apport principal étant effectué avant la période de besoins intenses.

Par contre, pour les cultures ayant des besoins globaux peu élevés, ou à cycle végétatif court (orge de printemps, tournesol), la totalité de l'azote sera apportée en une seule fois, à l'implantation ou à la levée de la culture.

## 6 CONCLUSION

S'appuyant sur des bases théoriques que les chercheurs précisent et perfectionnent d'année en année, le raisonnement de la fumure azotée, assorti d'observations locales et de réflexions pratiques, permet un bon ajustement aux besoins réels des plantes et une meilleure valorisation sur le plan économique. Il concilie agriculture compétitive, qualité des eaux et respect de l'environnement.

La pratique de la fumure azotée peut être résumée par des slogans tels que :

**L'AZOTE, NI TROP, NI TROP PEU**

**LA BONNE DOSE, AU BON MOMENT**

# la Fertilisation Phosphatée

## 1 LE PHOSPHORE ET LA VIE

Le phosphore est présent dans de nombreuses molécules de la matière vivante où il joue un rôle essentiel. On le trouve à l'état de sels minéraux (les phosphates) dans les tissus végétaux et animaux, comme les feuilles de graminées, le lait, les os..., ou associé à des combinaisons organiques multiples, les acides nucléiques, les protéines du noyau, les chloroplastes.

Le phosphore intervient dans de nombreux métabolismes cellulaires : chez les végétaux, dans la photosynthèse des sucres, comme fixateur et transporteur d'énergie ; chez les animaux, dans la formation et la dégradation du glycogène des muscles, dans la synthèse des protéines...

Il joue un rôle plastique intervenant dans la structure de nombreuses molécules organiques : ainsi, dans le règne animal, il forme la trame minérale du squelette, à l'état de phosphate de calcium.

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

*Effet de la fertilisation phosphatée sur la fructification du haricot : 70 unités de N, 140 unités de K<sub>2</sub>O par hectare; à gauche : 50 unités P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; à droite : 200 unités P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.*



## 2 RÔLE DU PHOSPHORE DANS LES PLANTES

Le phosphore exerce plusieurs rôles physiologiques. Il favorise :

- **la croissance** : son action est conjuguée à celle de l'azote. Les besoins de la plante en N et P évoluent parallèlement avec les mêmes maximums, aux mêmes moments,
- le développement des racines et l'accroissement de la masse des radicelles, conditionnant une alimentation suffisante et une croissance rapide,
- la précocité, conséquence d'un développement racinaire important,
- la rigidité des tissus, rendant les végétaux plus résistants à la verse et aux maladies cryptogamiques (piétin des céréales),
- la reproduction : fécondation, fructification,
- la qualité des produits végétaux : tissus sains et riches en phosphore pour l'alimentation des hommes et des animaux. Une alimentation convenable en phosphore permet un développement harmonieux des plantes, qui peuvent prélever les quantités nécessaires sans limitation, tout au long de leur végétation et plus spécialement aux périodes de pointe : montaison, tubérisation, fructification.

### 3 RÔLE DU PHOSPHORE CHEZ LES ANIMAUX

Ce rôle est également multiple dans le règne animal. Le phosphore :

- est l'un des éléments de base du squelette ( les os frais renferment plus de 50 % de phosphate tricalcique) qui le tient en réserve à la disposition de l'organisme. Son insuffisance engendre des accidents graves : rachitisme, ostéomalacie, etc.

- participe à la régulation d'équilibres biologiques internes. Une insuffisance de phosphore dans l'alimentation peut conduire à des troubles divers : infécondité, hématurie de parturition, etc., et à une moindre résistance à certaines maladies, comme l'entérite paratuberculeuse.

Par conséquent, une alimentation à base de végétaux bien pourvus en phosphore (exprimé en P) du fait de leur développement sur un sol riche en phosphore (exprimé en  $P_2O_5$ ), couvrira l'essentiel des besoins de croissance et d'entretien des animaux.

### 4 LE PHOSPHORE DANS LE SOL

Des travaux récents (Gachon, Studer, Mme Boniface, Fardeau, Morel, Frossard, etc., pour ne citer que des agronomes français) donnent un éclairage nouveau sur la dynamique du phosphore dans les systèmes sol-plante. Ils s'appuient sur des travaux fondamentaux et des résultats d'essais de longue durée, mis en place dans les années 1970.

Les points essentiels sont :

- le prélèvement de phosphore par les racines des plantes n'a lieu que sous forme d'ions orthophosphates  $PO_4^{3-}$

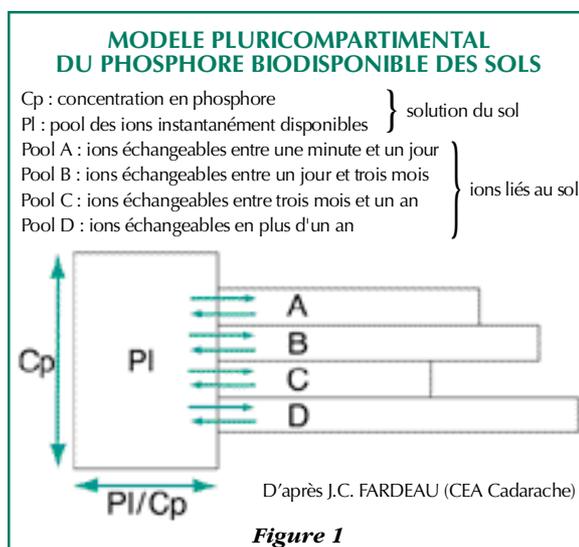
- ces ions se trouvent dans la solution du sol ; or, la concentration moyenne de celle-ci est de l'ordre de 0,2 mg P/litre. A un instant donné, la concentration du sol ne contient donc que quelques % du prélèvement total par la culture (2 ou 3% pour le blé, par exemple). En conséquence, la plus grande partie (70 à 80 %) du phosphore extrait du sol par les racines provient de sa phase solide, dont il doit être "libéré" ou désorbé durant la phase de croissance du végétal. La phase solide du sol contient une réserve en phosphore dit **biodisponible**, c'est-à-dire ayant la possibilité d'être absorbé par une plante. En moyenne, un tiers du phosphore biodisponible est associé à la matière organique, et deux tiers à la fraction minérale par l'intermédiaire d'ions  $Fe^{2+}$ ,  $Al^{3+}$  et  $Ca^{2+}$ .

- Il existe, pour les ions  $PO_4^{3-}$ , un **état d'équilibre** entre les phases solide et liquide propre à chaque système sol-solution.

- Selon les types de sol, cet état d'équilibre est réalisé plus ou moins facilement et rapidement.

On est ainsi amené à définir pour un sol :

- **le pouvoir tampon**, propriété que possèdent certains constituants du sol à "s'opposer" à une variation de la concentration en P de la solution du sol, due à un prélèvement par la plante et/ou à un apport d'élément fertilisant,
- **le pouvoir fixateur**, aptitude de certains constituants du sol à transformer des formes mobiles du phosphore en formes moins mobiles.



- Le P biodisponible est caractérisé par trois paramètres interdépendants dans un type de sol donné :

- **l'intensité**, proportionnelle à la concentration des ions  $PO_4^{3-}$  dans la solution du sol, directement en contact avec les racines, et capables de répondre aux **besoins instantanés** de la plante ( $C_p$ , fig. 1),

- **la capacité**, aptitude du sol à maintenir constante l'intensité, c'est-à-dire à **réalimenter la solution du sol** lorsque celle-ci s'épuise du fait des prélèvements par la plante, et à **fixer** une partie du P apporté. Cette notion est à relier à celle de pouvoir tampon et pouvoir fixateur ( $PI/C_p$  fig. 1),

- **la quantité** d'ions  $PO_4^{3-}$  susceptible de quitter la phase solide en un temps donné pour rejoindre la solution du sol (sur la fig. 1, la surface des différents compartiments est représentative du facteur quantité). Cette quantité peut être **approchée** à l'aide des analyses classiques donnant le "phosphore extractible".

Il est important de comprendre que les analyses habituelles ne peuvent permettre de caractériser le phosphore biodisponible que par le seul paramètre "quantité", celle-ci étant d'ailleurs

extraite du sol par un réactif chimique et non par la plante. Il est donc indispensable d'avoir des données sur les facteurs "intensité" et "capacité", si l'on veut avoir une idée plus précise de l'alimentation phosphatée de la plante sur un sol donné.

Ainsi justifie-t-on le classement, prouvé dans les essais de longue durée, entre plantes exigeantes, c'est-à-dire ayant une faible capacité à extraire du sol les quantités de phosphore nécessaires à leurs besoins, et plantes moyennement ou peu exigeantes. Les pertes de production associées à l'impasse continue de la fertilisation P ont été le critère retenu pour effectuer ce classement.

## 5 LA NUTRITION PHOSPHATÉE

- Le coefficient réel d'utilisation (C.R.U.), c'est-à-dire la fraction de l'apport prélevée par la plante, est compris entre 0 et 20 % durant l'année qui suit l'apport d'un engrais phosphaté et dans les conditions actuelles des pratiques agricoles. Il ne dépasse jamais 25 % dans les sols où, simultanément, la teneur en "phosphore extractible" est faible et le pouvoir fixateur peu élevé. Ce pourcentage de l'apport, utilisé par la plante, constitue l'**effet immédiat**.

L'intense compétition existant entre le sol et la plante pour les ions  $PO_4^{3-}$  apportés fait que la plus grande partie de ceux-ci gagne les différents compartiments du phosphore biodisponible du sol, et donne lieu à l'**effet résiduel**.

La répartition entre la plante et le sol est fonction de :

- la quantité apportée,
- la forme chimique de l'apport ; à noter que le C.R.U. du phosphore des résidus de récolte est au moins égal à celui des engrais contenant du P soluble eau,
- du sol, pH et pouvoir fixateur,
- du rendement de la culture,
- du temps de contact entre l'engrais et le sol : le C.R.U. des engrais diminue quand le temps de contact augmente. C'est l'effet "vieillesse", qui est particulièrement net pour les engrais phosphatés.

- Les conditions d'exploitation des réserves sont susceptibles de modifier les quantités transférées du sol vers la plante.

En effet :

- les quantités de P prélevées en un temps donné par une racine sont proportionnelles à la concentration des ions  $PO_4^{3-}$  aux abords de la zone active de la racine,
- les besoins de la plante au cours de son cycle végétatif ne sont pas constants. Il y a des périodes, surtout pour les plantes à forts prélèvements totaux et à cycle court, où les besoins **instantanés** sont élevés (cf. chapitre II).
- Les racines n'exploitent que 10 à 20% de l'horizon cultivé. Or, les ions  $PO_4^{3-}$  ne diffusent que sur une très courte distance, de l'ordre du millimètre. La plante doit donc les "rencontrer" quand elle en a besoin et en quantités suffisantes.

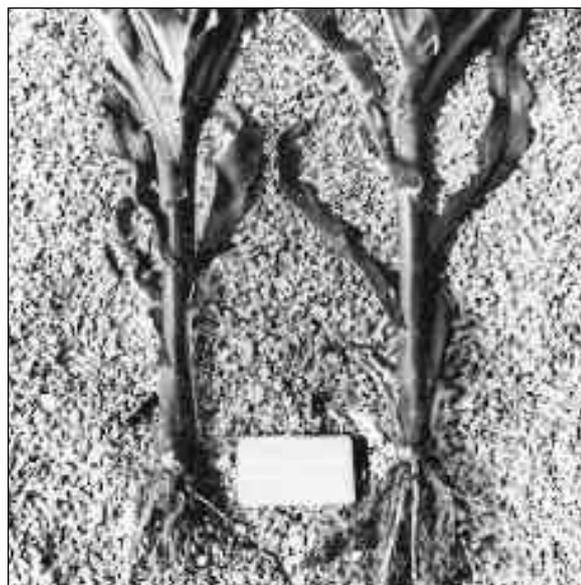
La nature du système racinaire et sa sensibilité aux conditions de préparation physique du sol peuvent donc jouer un rôle déterminant dans la nutrition phosphatée de la plante.

Exigence vis-à-vis de $P_2O_5$	Cultures
élevée	Betterave - colza - luzerne - pomme de terre - cultures légumières
moyenne	Blé dur - maïs ensilage - orge - pois ray-grass - sorgho - blé sur blé - autres cultures si absence de référence expérimentale
faible	Avoine - blé tendre - maïs grain - soja - toumesol

## 6 FUMURE PHOSPHATÉE : NOUVELLE STRATEGIE

La fertilisation phosphatée a pour objectif, tout en restant dans des conditions économiques de rentabilité, de satisfaire les besoins en P des plantes, qui dépendent des objectifs de rendement et de qualité, donc de compléter l'offre du sol, en maintenant son potentiel de production.

Le bouleversement du contexte économique en 1992 (PAC) - 1993 (GATT) a conduit à des diminutions, voire des impasses irraisonnées, en matière de fertilisation phosphatée. De plus,



Effet de la fumure phosphatée sur l'enracinement du maïs : à gauche témoin, à droite avec 50 unités  $P_2O_5$  supplémentaires par ha dans le lit de semence.

il devient très difficile de prévoir des rotations longues : on est donc amené, plus qu'avant, à raisonner "à l'année" et à adopter la stratégie de fertilisation à cette variabilité. Enfin, il y a les acquisitions scientifiques mentionnées dans les paragraphes précédents. Tout cet ensemble a conduit à faire évoluer le raisonnement de la fumure phosphatée (Pour plus de détails, cf. "Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphatée et potassique", COMIFER, novembre 1993).

La stratégie actuelle de la fumure phosphatée se fonde en premier lieu sur les besoins des plantes cultivées, et ensuite sur la disponibilité en P de la parcelle. Trois critères sont donc à prendre en compte :

- **l'exigence en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de la culture** (Cf. § 5) : on ne fera jamais d'impasse sur une culture exigeante. Ne pas confondre "exigences" et "besoins".

- **l'analyse de terre** (Cf. chapitre I). Peu à peu, l'interprétation devra se baser sur un référentiel agronomique régional, nécessaire à l'établissement de **normes** auxquelles sera comparée la "teneur" mesurée t. Ces normes comporteront **deux valeurs seuils** par type de sol et par culture :

- T impasse, teneur au-dessus de laquelle une impasse annuelle n'entraîne pas de diminution supérieure à 10 % du rendement de la culture considérée. Par exemple, tous types de sols confondus, T impasse sur blé (faible exigence) serait de 90 ppm Dyer ou 73 Joret-Hebert, ou 28 Olsen, d'après Planchette, Morel et Fardeau.

- T renforcé, teneur au-dessous de laquelle il est nécessaire d'apporter une dose de **P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>** supérieure à la dose dite d'entretien procurant un supplément de rendement d'au moins 10 %.

- La dose d'entretien est appliquée dans les situations où la biodisponibilité du P est jugée correcte : T renforcé < t < T impasse. On aboutit ainsi à trois domaines, correspondant à :

t < T renforcé (sol "pauvre")

T renforcé < t < T impasse ("moyennement pourvu")

t > T impasse ("riche")

- **le passé récent de fertilisation** . La diminution de "biodisponibi-

lité" du phosphore apporté par les engrais est très variable selon les situations. En l'état actuel des connaissances, on propose une appréciation de cette notion au moyen du pouvoir fixateur (§ 4) et le bilan F-E (fumures moins exportations), calculé sur les quatre dernières années (Cf. chapitre XII).

Il ne faut pas courir le risque de pénaliser la production après un an sans apport de P, car la disponibilité de cet élément dans le sol ne peut plus alors être garantie.

Il est enfin suggéré de ne tenir compte de la restitution des résidus du précédent cultural que si elle dépasse 40 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha.

## 7 MODALITES D'APPORT DES ENGRAIS PHOSPHATES

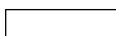
Dans les conditions économiques actuelles, il est conseillé de faire l'apport d'engrais phosphatés - si nécessaire - chaque année, au plus près des besoins de la culture. En plus, sur le plan agronomique, ceci est justifié par la diminution du C.R.U. quand le temps de contact engrais/sol augmente.

Néanmoins, la faible mobilité de l'ion PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> dans le sol rend nécessaire de le disposer au plus près du système racinaire actif.

Le respect simultané de ces deux conditions n'exclut pas la pratique de la fumure phosphatée d'automne - meilleure répartition du P sur la profondeur du labour - et conduit même à préconiser un fractionnement automne/printemps dans le cas de cultures exigeantes sur sol à réserve biodisponible faible ou moyenne et/ou à pouvoir fixateur élevé.

Les différentes formes d'engrais phosphatés n'ont pas toutes la même efficacité selon le type de sol. Ceci est à prendre en compte sous les aspects agronomique et économique. Le plus souvent, la préférence sera donnée aux engrais apportant le phosphore sous forme soluble eau ou soluble citrate d'ammonium neutre, surtout dans le **cas d'une biodisponibilité faible**.

Forme des engrais P \ pH eau du sol	pH 5,5	5,5 < pH 6,2	6,2 pH 7,2 ou CaCO <sub>3</sub> < 10 %	CaCO <sub>3</sub> 10 %
Phosphate d'ammoniaque Superphosphate				
Bicalciques				
Scories Thomas				
Phosphates alumino-calciques				
Phosphates naturels				

 utilisable

 déconseillée

**Choix du type d'engrais selon le pH** (d'après COMIFER)

dans les cas de sol à biodisponibilité moyenne et élevée

# la Fertilisation Potassique

## 1 LE POTASSIUM ET LA VIE

Le potassium est indispensable à la vie : il participe directement à la formation et à la croissance des cellules.

Il assure de nombreuses fonctions vitales de l'organisme des animaux supérieurs et de l'homme, et contribue au bon fonctionnement du cœur, des muscles, du cerveau, des nerfs et des glandes. Une déficience grave en potassium, soit par insuffisance d'apports, soit plus souvent par pertes excessives, peut entraîner rapidement la mort, car la cellule n'assimile plus les substances nutritives.

## 2 LE POTASSIUM ET LA PLANTE

Le potassium est toujours abondant dans la matière sèche des végétaux : de 0,5 à 1,5 % dans le grain et les pailles de blé, de 2 à 4 % dans les tubercules et fanes de pommes de terre, et jusqu'à 6 à 7 % dans les épinards et les champignons.

Très mobile dans la plante, le potassium y joue un rôle multiple :

- il intervient dans l'équilibre acido-basique des cellules et régularise les échanges intracellulaires.

- il active la photosynthèse et favorise la formation des glucides (sucres, amidon) dans la feuille et leur accumulation dans les organes de réserve (racines des betteraves, tubercules des pommes de terre). C'est pourquoi les plantes racines et les tubercules répondent particulièrement bien aux engrais potassiques.

- il participe à la formation des protéines, intervient dans les processus d'évolution des composés azotés dans la plante et favorise leur migration vers les organes de réserve. **Les besoins en potassium sont d'autant plus grands que la fertilisation azotée est plus importante** : l'effet de l'azote est renforcé par le potassium et réciproquement ; c'est le phénomène d'interaction positive.

- il prépare l'élaboration des lipides.

En réduisant la transpiration, le potassium diminue les besoins des plantes en eau, augmente leur résistance à la sécheresse et assure une meilleure efficacité de l'irrigation.

Il permet une meilleure résistance au froid, aux maladies et aux insectes.

Avec l'anhydride phosphorique, il accroît le développement des racines et la rigidité des tissus végétaux, d'où une meilleure résistance des plantes à la verse.



*L'exportation de potasse est très importante sur prairies ensilées.*

### 3 LE POTASSIUM DANS LE SOL

Il se trouve dans le sol sous quatre formes :

- en solution dans l'eau du sol.
- retenu (adsorbé) à la surface des particules d'argile et d'humus (complexe adsorbant) : il sert à compenser les prélèvements effectués par les racines dans la solution du sol. C'est donc l'ensemble du potassium de la solution du sol et du complexe adsorbant qui est utilisable par la plante : c'est le potassium échangeable, déterminé par l'analyse à l'acétate d'ammonium, qui illustre la quantité d'ions  $K^+$  susceptibles de quitter la phase solide pour rejoindre la solution.
- inclus pour la plus grande partie entre les feuillettes des argiles : cette forme non échangeable est très lentement libérée lorsque le sol s'appauvrit en potasse échangeable. Il est de l'intérêt de l'agriculture intensive de ne pas compter sur elle, ce qui nécessite le maintien du potassium échangeable à un bon niveau.
- entrant dans la constitution des minéraux primaires (roche mère) : cette forme est très lentement libérée au cours des pro-



Vue générale de la station agronomique d'Aspach-le-Bas (Haut Rhin).  
Société Commerciale des Potasses et de l'Azote.

cessus d'altération.

Le potassium biodisponible dans le sol n'est pas un ensemble unique et homogène. Il est libéré durant la phase de croissance du végétal à partir de la phase solide du sol. Pour y accéder, il faut connaître trois paramètres : l'intensité, la capacité à maintenir le facteur intensité et la quantité.

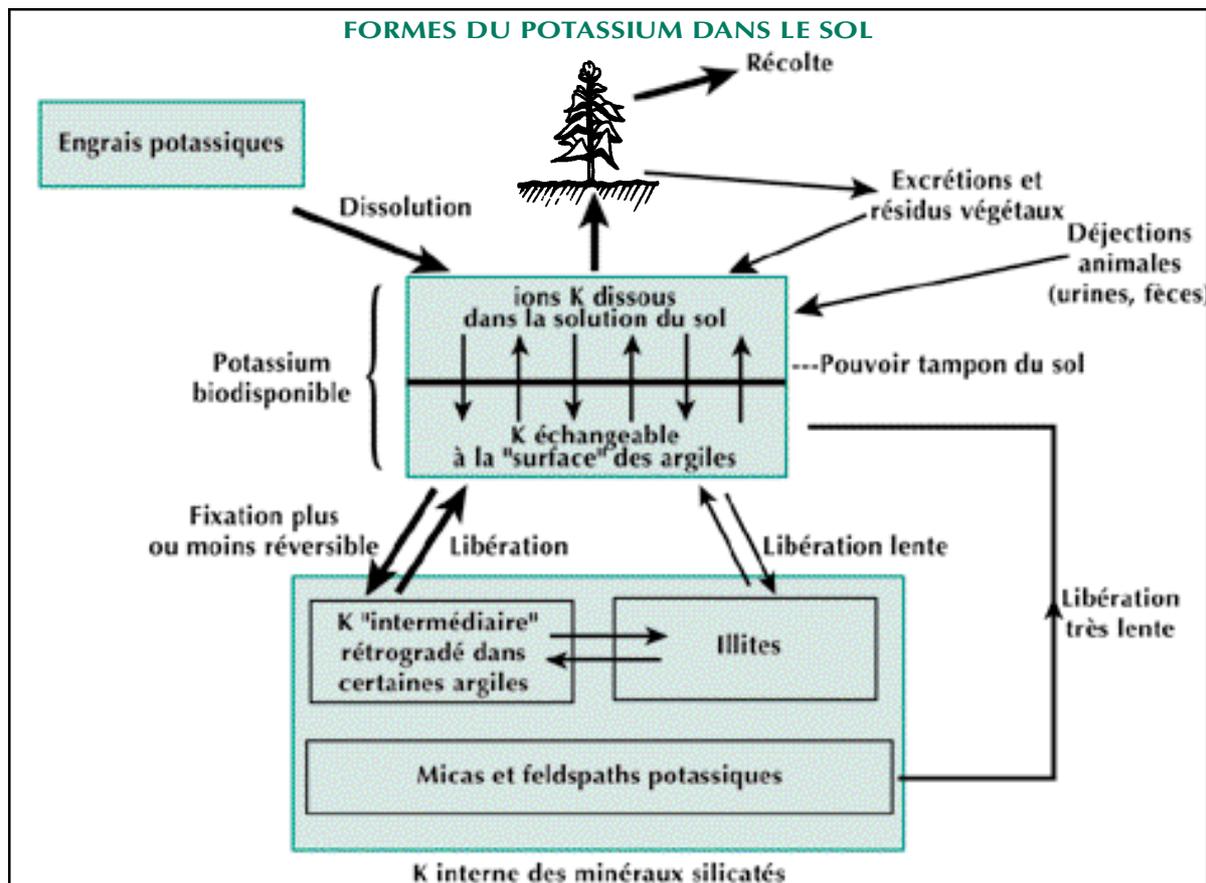
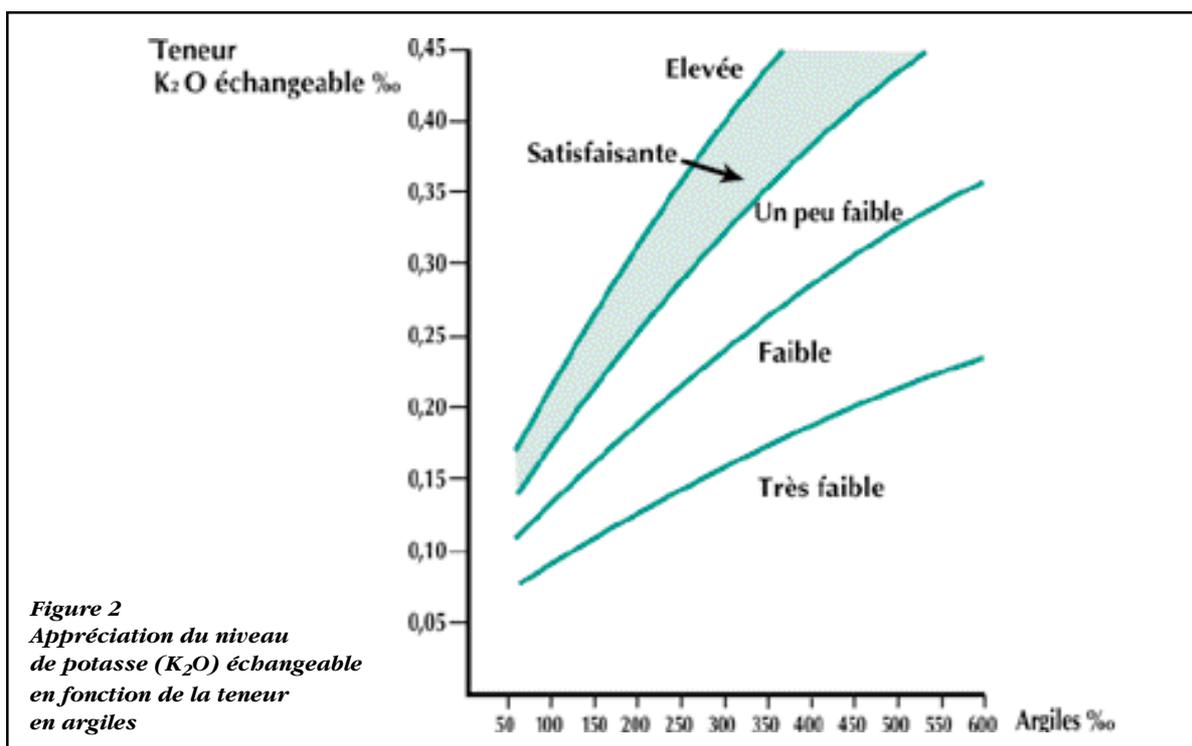


Figure 1

## 4 LA NUTRITION POTASSIQUE

- Le coefficient réel d'utilisation (C.R.U.) du potassium (cf. chapitre VII-5), durant l'année qui suit l'apport, est compris entre 15 et 30 %. Comme pour les ions  $\text{PO}_4^{3-}$ , il y a une intense compétition entre le sol et la plante pour les ions  $\text{K}^+$ .

Ceux-ci viennent se fixer entre les feuillets des argiles. Le pouvoir fixateur du sol vis-à-vis de K dépend de sa teneur en argiles et de la nature de celles-ci. Plus un sol est pourvu en argile (CEC élevée), plus il "fixe" la potasse et il faut en tenir compte pour apprécier le niveau du  $\text{K}_2\text{O}$  échangeable du sol (Cf. figure 2).



- Comme pour le phosphore, il semblerait nécessaire de revoir le concept "vieille graisse" selon les types de sol.
- Les conditions d'exploitation du sol par la plante sont susceptibles de modifier les quantités de potassium transférées de l'un à l'autre :
  - les quantités de K prélevées en un temps donné sont proportionnelles à la concentration d'ions  $\text{K}^+$  aux abords de la zone active de la racine,
  - l'observation d'une courbe de prélèvement en K fait ressortir la très grande variation des quantités extraites par une

plante au cours de son cycle végétatif. Ces besoins **instantanés** peuvent dépasser 15 kg  $\text{K}_2\text{O}$  par jour par hectare ; la solution du sol, qui n'en contient que quelques kilos, doit pouvoir être "réapprovisionnée" plusieurs fois par jour pour satisfaire les besoins de la plante,

- la mobilité des ions  $\text{K}^+$  dans le sol, bien que supérieure à celle des ions  $\text{PO}_4^{3-}$ , n'est pas très élevée (de l'ordre du centimètre). Selon la nature et les aptitudes de son système racinaire, la plante a une capacité plus ou moins grande à extraire du sol le potassium nécessaire à ses besoins. On distingue ainsi des plantes d'**exigences** différentes :

Exigence en $\text{K}_2\text{O}$	Cultures
Elevée	betterave, pomme de terre, cultures légumières
Moyenne	colza, luzerne, maïs ensilage et grain, pois, ray-grass, tournesol, soja
Faible	avoine, blé dur et tendre, orge, sorgho

## 5 FUMURE POTASSIQUE

Comme pour le phosphore, une nouvelle stratégie de fertilisation potassique a été proposée par le COMIFER (novembre 1993) ; elle est basée sur les mêmes critères :

- **Exigence en  $K_2O$  de la culture** : aucune impasse sur une culture exigeante, quelle que soit la teneur du sol en K échangeable (Kéch.).
- **Analyse de terre** : progressivement, son interprétation devra se baser sur un référentiel agronomique permettant d'établir des normes et notamment **T impasse** et **T renforcé** (cf. chapitre VII). Pour le potassium, la notion de **Kéch. minimal** devrait aussi être prise en considération : c'est la quantité de Kéch. restant présente dans le sol alors que la plante souffre de carence aiguë, voire létale, en potassium ; ce semble être une caractéristique intrinsèque d'un sol donné, quel que soit l'historique de fertilisation (P. Villemin. 1993). Cette valeur permettrait d'approcher celle de **T renforcé** et d'être considérée comme un indicateur de risque.
- **Passé récent de fertilisation** sur les quatre dernières années : par convention, le souci de ne prendre aucun risque de pénaliser la production conduit à considérer que, après 2 ou 3 ans sans apport de K, on ne peut plus garantir une alimentation non limitante des cultures, même non exigeantes.
- **Restitution des résidus du précédent cultural** : les résidus de

culture ont un C.R.U égal ou supérieur à celui des engrais minéraux. Il faut donc en tenir compte dans la fumure à apporter, lorsque cette restitution dépasse 80 kg  $K_2O$ /ha (COMIFER 1993).

**Le choix des engrais potassiques à utiliser** est fonction de la sensibilité de la culture à l'ion  $Cl^-$  : les cultures sensibles **nécessitent** l'emploi du sulfate de potassium. Celui-ci est également recommandé pour un objectif qualité de certaines productions (vins, fruits, légumes).

Comme pour les engrais phosphatés, on s'oriente vers une pratique annuelle de la fertilisation potassique, l'apport "bloqué" en tête de rotation étant abandonné.

**L'apport d'engrais potassique** est réalisé avant l'implantation de la culture, ou en automne-hiver pour les cultures pérennes, principalement sous forme de binaires PK. Néanmoins, il est des cas où il est recommandé de fractionner la fumure potassique pour assurer une meilleure efficacité ; par exemple :

- sur les prairies en exploitation intensive, apporter 2/3 de la fumure potassique en automne-hiver et 1/3 fin juin pour couvrir les besoins jusqu'à l'automne et favoriser l'équilibre graminées-légumineuses.
- sur céréales d'automne, la fumure potassique apportée avant le semis peut être complétée par un nouvel apport de potasse lors du premier apport d'azote au tallage, sous forme d'engrais composés ternaires, pratique particulièrement recommandée dans les terres pauvres en potasse.



*La pomme de terre nécessite une forte fumure potassique.*

# Éléments Secondaires Oligo-éléments

En plus des éléments nutritifs majeurs, azote, phosphore et potassium, la plante doit trouver dans le sol :

- des éléments nutritifs secondaires pour lesquels les prélèvements se chiffrent en kilogrammes par hectare : le soufre, le calcium et le magnésium,
- des oligo-éléments dont les prélèvements se mesurent en grammes par hectare ; les principaux sont : le fer, le manganèse, le cuivre, le zinc, le bore, le molybdène.

## 1 LES ELEMENTS SECONDAIRES

### LE CALCIUM (Ca) ET LE MAGNESIUM (Mg)

Les rôles "aliment" et "amendement" du calcium et du magnésium sont traités dans le chapitre V.

### LE SOUFRE (S)

Le soufre entre dans la composition de certains acides aminés indispensables aux êtres vivants (méthionine, cystine) : c'est donc un élément nécessaire à la synthèse des protéines. On conçoit alors que les besoins d'une plante en soufre et en azote se manifestent durant les mêmes périodes de la végétation. Le soufre intervient également dans la composition d'enzymes et de certaines vitamines.

Les plantes prélèvent le soufre du sol sous forme de sulfates  $SO_4$ . Elles peuvent aussi absorber des quantités importantes d'anhydride sulfureux atmosphérique ( $SO_2$ ) à travers leurs stomates.

Les besoins varient selon les espèces. Exprimés en anhydride sulfurique ( $SO_3$ ), ils s'élèvent à :

- crucifères (colza, choux), liliacées (ail, oignon, poireau) : 175 à 200 kg/ha,
- légumineuses : 100 kg/ha,
- autres cultures (céréales, betteraves, plantes fourragères) : 30 à 75 kg/ha.

Le lessivage des sulfates (50 à plus de 100 kg de  $SO_3$  par hectare et par an) s'ajoutant aux prélèvements par les



Carence en magnésium sur maïs.

récoltes, le sol peut perdre chaque année de 100 à 300 kilos de  $SO_3$  par hectare.

Les restitutions par les pluies (20 à 50 kg de  $SO_3$  par hectare et par an, davantage au voisinage des zones industrielles) et l'utilisation d'engrais contenant du soufre permettent de compenser ces pertes.

Certains engrais complexes de concentration moyenne contiennent des quantités non négligeables de soufre ; il en est de même pour les engrais dépourvus de chlore où l'ion sulfate remplace cet élément.

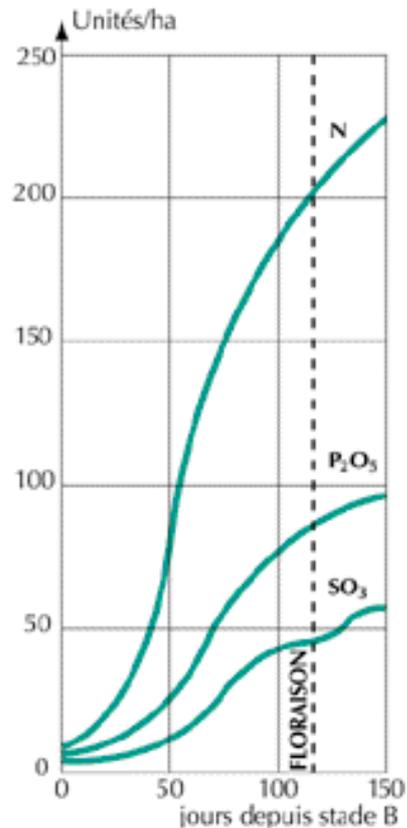
On peut également épandre du sulfate de calcium, du phosphogypse qui contient 47%  $SO_3$ , ou pulvériser sur le feuillage des spécialités riches en soufre, certaines renfermant jusqu'à 30 % de  $SO_3$ .

En grande culture, l'attention sera particulièrement portée sur la fumure soufrée :

- du colza, pour lequel, en culture intensive, un apport systématique de 75 à 100 kg de  $SO_3$ /ha est recommandé, en même temps que le premier apport d'azote au sud de la Loire, avec le deuxième apport d'azote ou, en tout cas, pas avant fin février en zone nord.

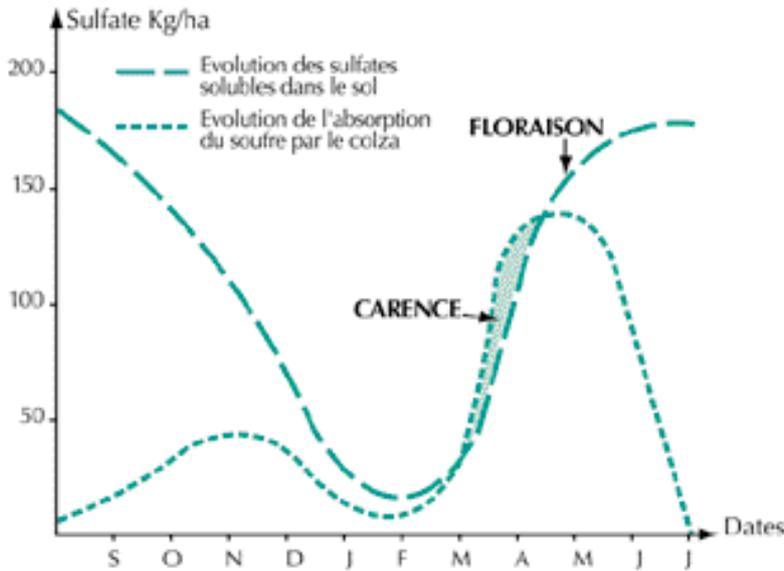
Nature du fertilisant organique ou minéral	% de $SO_3$
Fumier .....	0,12
Sulfate d'ammoniaque .....	57
Sulfate de potassium .....	42
Superphosphate 18 % $P_2O_5$ .....	29
Superphosphate 25 % $P_2O_5$ .....	19
Patentkali .....	45
Kiesérite 26 % MgO .....	50

**Courbes d'absorptions comparées du soufre, du phosphore et de l'azote sur blé**  
(Thevenet/ITCF)



**Figure 2**

**Evolution schématique comparée des sulfates solubles dans le sol et l'absorption des sulfates par le colza**  
(Radet/INRA)



**Figure 1**

- du blé, qui peut manifester des symptômes de carence (jaunissement du bout des feuilles au tallage) en terres calcaires, superficielles et filtrantes, sans que cela entraîne toujours des conséquences sur le rendement.

De façon plus générale, le soufre est un élément dont le bilan a tendance à être de plus en plus déficitaire par suite de :

- l'utilisation plus grande d'engrais contenant peu ou pas de soufre,
- l'augmentation des rendements, donc des besoins des plantes en S,
- la réduction des fumures organiques dans de nombreuses exploitations ayant abandonné l'élevage,
- la diminution du soufre atmosphérique (lutte contre les pluies acides).

## 2 LES OLIGO-ELEMENTS

Ce sont des corps simples, métaux ou métalloïdes, autres que N, P, K, S, Ca, Mg, apportés sous formes diverses, qui participent à très faibles doses à la nutrition des végétaux.

Leur absorption insuffisante provoque des troubles de végétation appelés maladies de carence ; elles proviennent :

- soit d'une teneur insuffisante du sol en tel élément, révélé par l'analyse de sol (carence vraie),

- soit d'une mauvaise assimilation due à un autre facteur (carence induite) montrée par l'analyse foliaire.

L'assimilabilité des oligo-éléments, sauf celle du molybdène, diminue avec l'élévation du pH. D'autres conditions de sol interviennent aussi (matière organique, humidité, aération, structure, etc.).

Les carences en oligo-éléments ont tendance à augmenter avec les rendements, l'utilisation d'engrais plus concentrés et la place réduite de la fumure organique. Néanmoins, il faut éviter toute généralisation excessive en ce domaine. En grande culture, l'attention sera surtout attirée sur :

Céréales à paille	:	Cuivre, Manganèse
Maïs	:	Zinc, Manganèse
Colza	:	Bore, Molybdène
Tournesol	:	Bore, Molybdène
Betteraves	:	Bore, Manganèse
Soja - Pois	:	Fer, Manganèse

### LE FER (Fe)

Il est présent surtout dans les jeunes feuilles où il intervient dans la formation de la chlorophylle.

Les besoins des cultures s'élèvent à 2 kg par hectare et par an.

Les sols sont généralement bien pourvus en fer. Toutefois, en

---

cas d'insolubilisation du fer par un excès de calcaire, des carences se manifestent, principalement dans les tissus jeunes, par un jaunissement plus ou moins prononcé : c'est la chlorose ferrique qui s'observe surtout sur plantes d'ornement, vignes et arbres fruitiers. Certains porte-greffes y sont spécialement sensibles. On observe cette carence aussi sur le pois protéagineux et le soja.

On remédie à la chlorose par apport au sol de chélates ou par pulvérisation sur les feuilles de spécialités à base de fer.

### **LE MANGANESE ((Mn))**

Il est nécessaire au développement normal des plantes car il est lié au fer dans son action sur la formation de la chlorophylle.

Le manganèse est prélevé par les cultures en petites quantités : 400-500 g par hectare et par an. Les sols en contiennent suffisamment dans la plupart des cas.

La carence est due le plus souvent à une insolubilisation du manganèse, liée à l'élévation du pH et au drainage qui favorise l'oxydation de Mn. C'est pourquoi la carence en manganèse se rencontre surtout après des apports excessifs d'amendements calcaires ainsi qu'en présence de fortes quantités de matière organique (cas des vieux sols horticoles surchaulés) quand le sol est très aéré. En effet, l'absorption du manganèse par la plante s'opère sous la forme réduite  $Mn^{++}$ .

Sur céréales à paille et sur maïs, la carence donne des plantes chlorotiques et molles. Sur maïs, les 3/4 du manganèse sont absorbés de la levée à la floraison.

En cas de carence grave, des pulvérisations répétées de sulfate ou d'oxyde de manganèse à 0,1-0,5 % donnent de bons résultats. Les apports directs au sol sont à éviter.

### **LE CUIVRE (Cu)**

C'est un activateur d'enzyme, qui joue également un rôle dans le métabolisme des protéines et la synthèse de la chlorophylle.

Les prélèvements des plantes ne dépassent pas 60 g par hectare.

Il s'agit souvent de carence vraie en terrains riches en matière organique, sols de défriches, terres tourbeuses. Une mauvaise assimilabilité en sols calcaires, riches en matière organique et en phosphore, peut entraîner une carence induite sur céréales à paille.

Sur céréales à paille, la carence en cuivre provoque la maladie des "bouts blancs", d'où résultent ensuite des épis vides, et des repousses après récolte.

Le traitement consiste à épandre sur le sol du sulfate de cuivre (20-100 kg/ha) ou à pulvériser sur les feuilles, soit du sulfate, soit de l'oxyde de cuivre. En terrain calcaire ou dans un sol riche en matière organique, les apports de cuivre présentent beaucoup moins de risques que dans un terrain léger



*Carence en zinc sur maïs.*

et acide à faible pouvoir absorbant, où un excès de cet élément peut être toxique.

### **LE ZINC (Zn)**

Le zinc est nécessaire à la formation de certaines auxines. De ce fait, il intervient dans la régulation de la croissance et dans la transformation des sucres de la plante.

Les récoltes prélèvent en moyenne 200 g de zinc par hectare; alors que les réserves du sol dépassent 150 kg, il peut apparaître des carences induites qui se manifestent par une chlorose avec réduction de la croissance.

Sur pommier, la carence est typique et facilement reconnaissable (maladie de la rosette).

Sur maïs, elle est liée à un blocage du zinc par excès d'alcalinité ou à un antagonisme phosphore-zinc. Le maïs absorbe de 350 à 400 g de zinc/ha, dont 70% de la levée à la floraison.

On remédie à la carence en zinc en épandant sur le sol du sulfate de zinc (25 kg/ha) ou du nitrate de zinc. On peut également procéder à des pulvérisations sur le feuillage de spécialités apportant le zinc sous forme de sulfate (1 à 1,5% neutralisé), de nitrate ou d'oxyde. Il est également possible de recourir à des engrais contenant du zinc.

### **LE BORE (B)**

Son rôle est complexe. Il intervient dans le transfert des sucres, les phénomènes respiratoires, la fécondation, l'absorption de l'eau, la constitution des membranes cellulaires.

Les pertes en bore dues aux exportations par les cultures et

au lessivage s'élèvent à 200-300 g par hectare et par an.

Les carences en bore sont provoquées, le plus souvent, soit par une insolubilisation due à l'alcalinité du sol (chaulage excessif) ou à la sécheresse (remontée en surface du bore), soit par le lessivage dans les sols très acides ou filtrants.

Certaines plantes sont particulièrement sensibles à cette carence : les betteraves (maladie du coeur), le tournesol (grillure des feuilles), les pommiers (maladie du liège), la luzerne.

Pour lutter contre la carence en bore, on recommande d'utiliser des engrais spéciaux contenant du bore ou des sels boratés (borax - 15-50 kg/ha).

En cas d'urgence, des pulvérisations foliaires à base de borates sont efficaces.

### **LE MOLYBDENE (Mo)**

Il intervient dans la fixation de l'azote de l'air par les nodosités des légumineuses, de même que dans la transformation des nitrates à l'intérieur des tissus de la plante.

Les végétaux en prélèvent 10 g par hectare/an.

Généralement, les carences apparaissent dans les sols acides et sur des plantes sensibles, comme les choux-fleurs, les melons, la luzerne.

Il suffit de pulvériser du molybdate d'ammonium (5 g/100 l à raison de 500-600 litres/ha) pour faire disparaître les signes de carence.

## **3 AUTRES ELEMENTS**

### **LE CHLORE (Cl)**

Ce n'est que tout récemment que sa présence est apparue comme indispensable.

Les apports de chlore par les eaux de pluie (20 kg/ha/an en moyenne) et par les engrais suffisent à assurer les besoins en chlore des plantes, bien que cet élément ne soit pas fixé par l'argile du sol.

Certaines plantes sont cependant très sensibles au chlore, comme le lin et le tabac, ou simplement sensibles (haricot, laitue, concombre, oignon, fraisier) ; leur fertilisation avec des engrais contenant du chlore est soit prohibée, soit déconseillée.

Dans le cas du tabac, la présence du chlore diminue la combustibilité.

### **LE SODIUM (Na)**

Il est rencontré dans toutes les espèces végétales. Utile à certaines d'entre elles, il est surtout indispensable à la nutrition minérale des animaux.



*Carence en bore sur betterave (maladie du coeur).*

### **AUTRES OLIGO-ELEMENTS**

L'iode, le cobalt, le sélénium, le fluor, sont essentiels pour le développement animal, mais semblent avoir moins d'importance pour les plantes. Toutefois, le cobalt est nécessaire au développement des bactéries des légumineuses.

## **4 CONCLUSION**

Lorsqu'une carence a été reconnue, il faut y remédier par l'apport dans la fertilisation de l'élément déficitaire, au moyen des engrais spéciaux apportés au sol ou en pulvérisation sur le feuillage.

Des apports préventifs à forte dose sont déconseillés, car un excès d'oligo-éléments peut présenter autant d'inconvénients pour la bonne alimentation de la plante qu'une carence. Il existe en effet, pour la plupart de ces éléments, un faible écart entre seuil de carence et seuil de toxicité. Par contre, des apports répétés à dose modérée peuvent être envisagés pour certaines productions, lorsque l'utilité est montrée par l'analyse de sol, complétée, le cas échéant, par l'analyse foliaire.

La législation permet de déclarer des teneurs garanties en éléments secondaires et/ou oligo-éléments dans les conditions définies par les textes réglementaires ( voir chapitre X).

# les Engrais

## FABRICATION - COMPOSITION - LEGISLATION

### 1 LES ENGRAIS MINÉRAUX

#### LES ENGRAIS AZOTES SIMPLES

Ils sont principalement fabriqués à partir de l'ammoniac  $NH_3$  obtenu par combinaison de deux gaz :

- l'azote extrait de l'air,
- l'hydrogène provenant :
  - du gaz naturel (pour la quasi-totalité de  $NH_3$  produit en France)
  - des hydrocarbures
  - du charbon
  - de l'électrolyse de l'eau.

La synthèse de l'ammoniac à partir de l'hydrogène et de l'azote se fait dans un réacteur contenant un catalyseur, sous une température et une pression élevées.

L'ammoniac est utilisé pour la fabrication des engrais azotés simples et complexes (cf. fig. 1).

On distingue :

#### LES ENGRAIS AMMONIACAUX

Ils fournissent de l'azote sous la seule forme ammoniacale.

##### ● Le sulfate d'ammoniaque

Il dose le plus souvent 21% d'azote et résulte :

- soit de la fabrication de produits intermédiaires (caprolactame, acrylonitrile...) utilisés dans l'industrie des fibres synthétiques,
- soit de la fixation par l'acide sulfurique de l'ammoniac de synthèse ou de récupération (gaz de cokeries).

##### ● L'ammoniac anhydre

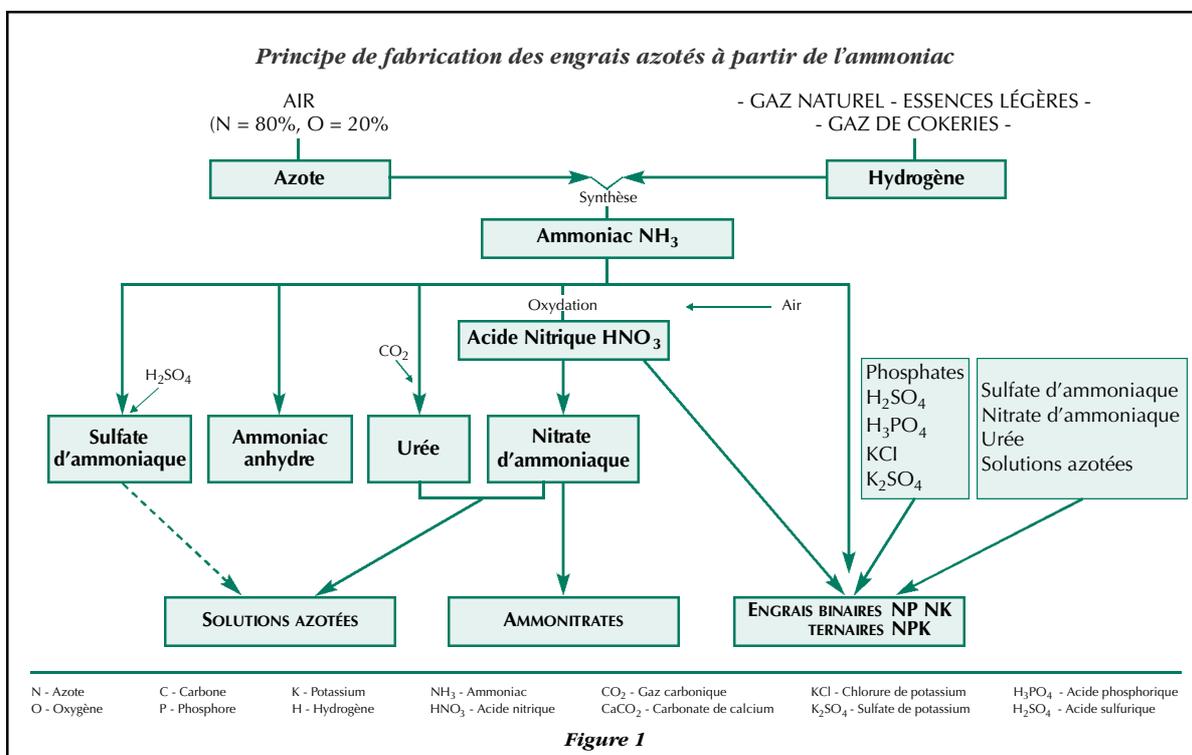
Dosant 82% d'azote ammoniacal, il est le plus concentré des engrais. C'est un gaz liquéfié, transporté sous pression à l'état liquide jusqu'au champ.

Il est injecté dans le sol à l'aide d'un épandeur type canadien à dents injectrices. A la pression ordinaire, le liquide se gazéifie, mais les molécules d'ammoniac sont fixées par le complexe adsorbant du sol.

Son emploi se justifie pour des doses variant de 80 à 200 kilos d'azote par hectare

#### L'AZOTE CYANAMIDÉ

La cyanamide calcique ( $CN_2Ca$ ), qui titre 18 à 21% d'azote cyanamidé et 60 à 70% de chaux, est peu utilisée. Elle présente surtout un intérêt pour son action désinfectante dans les herbages et en cultures maraîchères.



---

## L'AZOTE URÉIQUE

● **L'urée**  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  est obtenue par synthèse à partir de l'ammoniac et du gaz carbonique, lui-même obtenu lors de la fabrication de l'ammoniac. Elle dose 46 % d'azote, ce qui en fait l'engrais azoté solide le plus concentré.

Très soluble, l'urée se transforme rapidement en gaz carbonique et en azote ammoniacal qui évoluera vers la forme nitrique dans le sol.

Sa facilité de dissolution dans l'eau et l'innocuité relative de ses solutions sur le feuillage permettent de l'utiliser pour les pulvérisations foliaires (soit seule, soit en mélange avec des traitements antiparasitaires), et pour l'irrigation fertilisante.

Sa présentation physique est soit sous forme de perle, soit sous forme de granulé.

## LES ENGRAIS NITRIQUES

Ils contiennent de l'azote sous la seule forme nitrique.

● **Le nitrate de soude du Chili** contient 16 % d'azote nitrique, 2,5 % de sodium et de faibles quantités d'oligo-éléments (bore). Il est sous forme granulée.

● **Le nitrate de chaux** est un produit très hygroscopique qui dose 15,5 % d'azote nitrique et environ 26 % de calcium  $\text{CaO}$ . Il est sous forme granulée.

● **Le nitrate de chaux et de magnésie.**

Il titre 15 % d'azote nitrique, 14 % de chaux et 8 % de magnésie soluble dans l'eau. Il est sous forme granulée.

● **Le nitrate de potasse.**

Il titre 13 % d'azote nitrique et 44 % de potasse  $\text{K}_2\text{O}$  soluble dans l'eau. Il est sous forme granulée.

Les engrais nitriques sont peu utilisés ; ils sont employés généralement en cours de végétation au moment où la plante les absorbe rapidement.

## LES ENGRAIS AMMONIACO-NITRIQUES

Ils contiennent l'azote moitié sous forme ammoniacale, moitié sous forme nitrique.

● **Les Ammonitrates.**

Le nitrate d'ammoniaque, résultant de la neutralisation de l'acide nitrique par l'ammoniac, est additionné d'une matière de charge inerte plus ou moins importante (dolomie, craie...) pour donner des ammonitrates à moyen dosage, contenant de 26 à 27,5 % d'azote, ou à haut dosage titrant de 33 à 34,5 % d'azote.

Ce sont de loin les engrais azotés simples les plus utilisés en France, en raison de leur teneur élevée en azote, de leur bonne conservation, de leur souplesse d'emploi, et de leur efficacité agronomique due à leur composition mi-nitrique (azote immédiatement disponible pour la plante), mi-ammoniacale (effet à plus long terme).

Ils sont habituellement sous forme granulée, mais peuvent être aussi sous forme perlée.

● **Les solutions azotées.**

Elles sont fabriquées à partir du nitrate d'ammoniaque et de l'urée, parfois du sulfate d'ammoniaque.

On trouve notamment :

- Les solutions à base d'urée dosant 20 à 24 unités d'azote (N) pour 100 litres. Peu concentrées, elles sont aujourd'hui peu utilisées.
- Des solutions contenant du soufre qui sont un mélange de sulfate d'ammoniaque, de nitrate d'ammoniaque et d'urée dosant de 25 à 36 % N pour 100 litres, soit 20 à 28 % N et 10 à 18 %  $\text{SO}_3$  aux 100 kg.
- Et surtout des solutions de nitrate d'ammoniaque et d'urée titrant de 36 à 40 % N pour 100 litres, soit 28,3 à 30,7 % N pour 100 kg.

Par exemple, la solution azotée 390, de densité 1,3, contient 30 % N pour 100 kg, ou 39 % N pour 100 litres ; la moitié de cet azote est sous forme uréique, 1/4 sous forme ammoniacale et 1/4 sous forme nitrique.

Les solutions azotées sont employées le plus souvent en pulvérisation avant semis ou sur cultures en végétation. Elles sont en général corrosives et nécessitent l'utilisation d'un matériel en acier inoxydable ou en matière plastique.

Les **ammonitrates, les solutions azotées et l'urée** pris ensemble apportent environ 95 % de l'azote des engrais azotés simples utilisés actuellement en France.

● **Les engrais azotés avec  $\text{SO}_3$  et/ou  $\text{MgO}$ .**

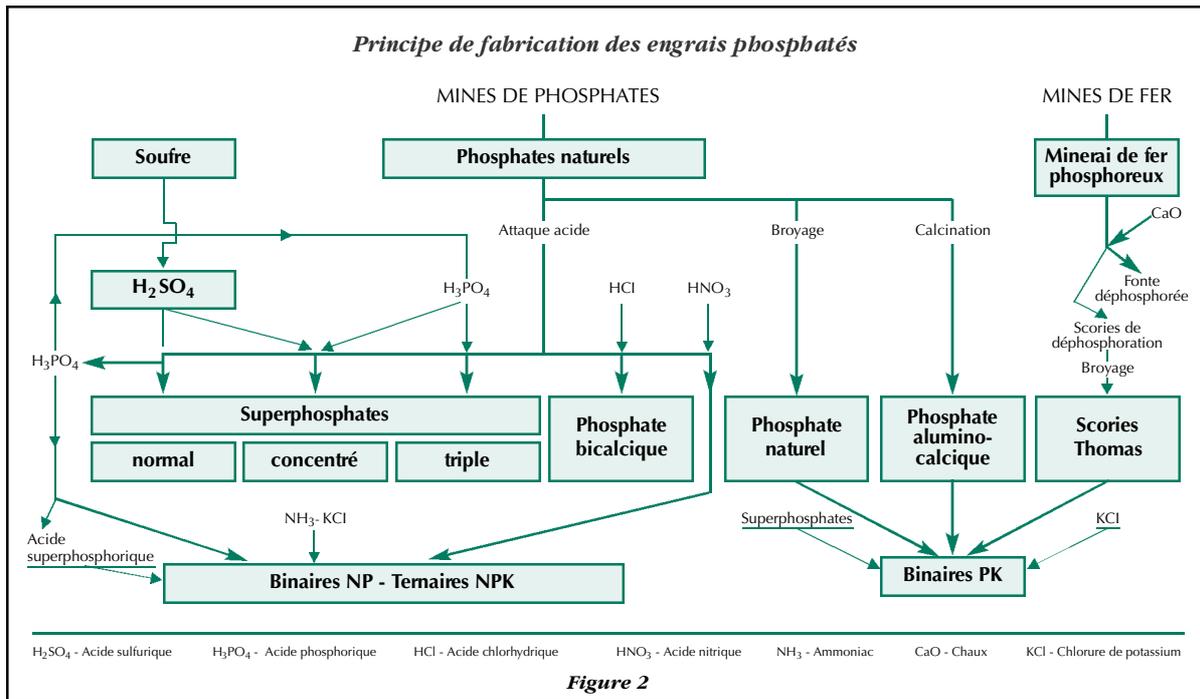
L'importance du soufre et de la magnésie étant reconnue dans l'alimentation des plantes, souvent en synergie avec l'azote, des ammonitrates peuvent être complétés avec  $\text{SO}_3$ , ou  $\text{SO}_3 + \text{MgO}$ . Leur dosage est de 25 à 28 % N, 8 à 12 %  $\text{SO}_3$  et 5 %  $\text{MgO}$ .

## LES ENGRAIS PHOSPHATÉS SIMPLES

L'industrie offre aux agriculteurs une gamme variée d'engrais phosphatés qui dérivent tous, à l'exception des scories Thomas, des phosphates naturels.

Les divers traitements subis en usine par les phosphates

---



permettent de fabriquer une gamme de produits qui diffèrent par la forme sous laquelle se présente l'anhydride phosphorique (cf. fig. 2).

Les engrais phosphatés sont caractérisés par leur teneur en anhydride phosphorique ( $P_2O_5$ ) suivant les critères de solubilité (cf. point 4, Législation).

● **Superphosphates**

Définition

Ce sont des produits issus du traitement des phosphates naturels par l'acide sulfurique ou l'acide phosphorique ou par un mélange des deux.

Principe de fabrication

Le minerai, après divers traitements destinés à l'enrichir et à le débarrasser de ses impuretés, est finement broyé et soumis à une attaque acide dans un malaxeur. Le superphosphate formé prend consistance au cours d'un «mûrissement». Il est ensuite repris pour être granulé, séché et ensaché.

Selon l'acide employé, il s'effectue l'une des réactions indiquées ci-après :

- Phosphate naturel + acide sulfurique  
→ superphosphate normal.

- Phosphate naturel + (acide sulfurique + acide phosphorique)  
→ superphosphate concentré.
- Phosphate naturel + acide phosphorique  
→ superphosphate triple.

L'acide phosphorique utilisé est obtenu par attaque sulfurique complète des phosphates.

Aspect - composition

Les superphosphates sont essentiellement des mélanges de phosphate monocalcique soluble dans l'eau et de sulfate de calcium peu soluble, en proportions variables selon l'acide utilisé. Leur teneur en calcium varie de 15 à 22 %.

Ils contiennent en outre des oligo-éléments (manganèse, zinc, bore, fluor) provenant des phosphates naturels, rendus plus solubles par l'attaque acide.

Sels gris, peu hygroscopiques, de densité voisine de 1, ils ont la composition indiquée dans le tableau ci-dessous.

Utilisation

Les superphosphates conviennent à tous les types de sols et à toutes les cultures. En raison de leur grande solubilité dans l'eau, ce sont des engrais à action rapide, immédiatement assimilables par les plantes.

<b>COMPOSITION</b>			
<b>Types de superphosphates</b>	<b>Teneurs en <math>P_2O_5^*</math></b>	<b>Teneurs en sulfate de calcium</b>	<b>Teneurs en <math>SO_3</math></b>
Superphosphate normal	16 - 24 %	50 - 38 %	30 - 22 %
Superphosphate concentré	25-37 %	37 - 21 %	22 - 12 %
Superphosphate triple	au-dessus de 38 %	20 - 3 %	12 - 2 %

\*  $P_2O_5$  soluble dans le citrate d'ammonium neutre, 90 % de cette quantité doit être soluble dans l'eau (cf. point 4 Législation).

Grâce à cette propriété, ils sont tout indiqués en cas de situations difficiles (temps froid et humide, retard de végétation) ainsi que pour satisfaire les besoins importants des végétaux aux périodes critiques de leur croissance.

Les apports réguliers de superphosphate normal sur les litières, dans les locaux d'élevage, contribuent, par leurs effets bactériostatiques et bactéricides, à maintenir le cheptel en bon état sanitaire et enrichissent le fumier produit en phosphore et en azote (diminution des pertes d'azote ammoniacal).

Ces engrais sont en général présentés sous forme granulée.

### ● Phosphate alumino-calcique (Phospal)

#### Principe de fabrication

Le phosphate alumino-calcique est fabriqué à partir d'un minerai extrait d'une mine du Sénégal, qui est calciné, puis broyé.

#### Aspect - dosage

Il est de couleur rouge et dose 34 % de  $P_2O_5$  total dont 75 % est soluble dans le citrate d'ammonium alcalin de Joulie. La finesse de mouture doit être telle qu'au moins 90 % du produit passe au tamis à ouverture de maille 0,160 mm.

#### Utilisation

Cet engrais phosphaté, sans action sur le pH, convient à toutes les cultures. Son efficacité est maximum dans les sols bien pourvus en colloïdes argilo-humiques et dont le pH est alcalin ou peu inférieur à 7.

Employé comme engrais simple, il entre aussi dans la fabrication de certains engrais composés dont il améliore la tenue par son absence totale d'hygroscopicité.

La présentation physique est polyédrique (engrais compacté).

### ● Phosphate naturel partiellement solubilisé

Ce produit est obtenu par attaque partielle du phosphate naturel moulu, par l'acide sulfurique ou l'acide phosphorique. Il contient essentiellement du phosphate monocalcique, du phosphate tricalcique et du sulfate de calcium.

Sa teneur minimale en  $P_2O_5$  total est de 20 % ; au moins 40 % du  $P_2O_5$  total doit être soluble dans l'eau. En masse, 90 % minimum du produit doit passer au tamis à ouverture de maille 0,160 mm (poudre).

### ● Phosphates naturels tendres (fin ou semi-fin)

#### Définition

Produits obtenus par la mouture de phosphates minéraux naturels tendres dont les composants essentiels sont le phosphate tricalcique et le carbonate de calcium.

#### Aspect - dosage - caractéristiques

Les phosphates naturels tendres se présentent sous l'aspect d'une poudre beige de densité apparente voisine de 1,25.

Ils dosent au minimum 25 % et jusqu'à 33 % de  $P_2O_5$  total sous forme de phosphate tricalcique, et jusqu'à 35 % de calcium (Ca), lié au phosphate.

Deux critères permettent d'évaluer leur valeur fertilisante : la finesse de mouture (quantité de produit en pourcentage qui doit passer au travers d'un tamis à ouverture de maille déterminée) et la solubilité dans une solution d'acide formique à 2 % (réactif conventionnel). Ils permettent de



Fabrication d'acide sulfurique par procédé «contact au soufre»



Fabrication d'acide nitrique (usine d'Ambès).

---

distinguer les phosphates naturels tendres fins et les phosphates naturels tendres semi-fins.

Utilisation

Les phosphates naturels sont utilisés par les plantes du fait de leur solubilité en milieu acide qui facilite le contact avec les racines et l'attaque par les micro-organismes du sol. Ils conviennent particulièrement aux terres acides et riches en matière organique, et sont employés de préférence à l'automne en fumure de fond.

● **Scories Thomas**

Principe de fabrication

Certains minerais de fer renferment de 1,5 à 2 % de phosphore qu'il faut éliminer de la fonte pour obtenir des aciers utilisables, non cassants.

Les scories Thomas sont obtenues en insufflant dans la fonte phosphoreuse additionnée d'un fondant (chaux ou dolomie) un puissant jet d'air ou d'oxygène qui oxyde le phosphore et le transforme en acide phosphorique. Ce dernier se combine au calcium du fondant et donne naissance à des phosphates et silicophosphates complexes qui surnagent dans le bain en

fusion. Les scories sont séparées, puis finement broyées après refroidissement. Ce sont les scories de déphosphoration.

Aspect - dosage - composition

Les scories ont l'aspect d'une poudre fine et noirâtre, peu hygroscopique, dont la densité est voisine de 2. Elles titrent au minimum 12 % de  $P_2O_5$  total, dont 75 % au moins sont garantis solubles dans l'acide citrique à 2 %.

Les scories contiennent 10 % de chaux libre et 30 à 35 % de chaux liée au phosphore susceptible de jouer progressivement un rôle alcalinisant. Les scories renferment également du magnésium et divers oligo-éléments (manganèse, silicium, vanadium, fer, molybdène...); 75 % minimum du produit passe au tamis de maille 0,160 mm.

Utilisation

Du fait de leurs propriétés alcalinisantes et de leur solubilité particulière, les scories sont recherchées pour les terres pauvres en chaux, argileuses ou argilo-siliceuses, froides et humides, légères et acides. Utilisées comme engrais de «fond» à l'automne dans ces types de sol, elles peuvent convenir à toutes les cultures et spécialement aux prairies. Elles sont en outre employées pour la fertilisation des forêts.



*Magasin de stockage en vrac dans une usine d'engrais.*

### LES ENGRAIS POTASSIQUES SIMPLES

Le potassium se trouve dans des gisements naturels de mélanges de divers sels : chlorure de potassium, chlorure de sodium, sels de magnésium...

Les sels bruts les plus courants à l'état naturel sont :

- la sylvinite : chlorure de potassium et chlorure de sodium,
- la carnallite : chlorure de potassium et chlorure de magnésium,
- la kaïnite : chlorure de potassium et sulfate de magnésium.

C'est à partir de ces sels que sont préparés les engrais potassiques mis à la disposition de l'agriculteur (cf. fig. 3)

#### ● Le chlorure de potassium

Il est obtenu par des procédés physiques qui n'altèrent en rien les caractéristiques du minéral de potasse. C'est un sel pratiquement pur (KCl) qui se présente sous deux formes :

- le chlorure «perlé» à 61 % d'oxyde de potassium, en petites perles sphériques de 0,5 à 1,5 mm de diamètre,
- le chlorure granulé\* à 60 % d'oxyde de potassium, en petits fragments de 1 à 5 mm, obtenu par compactage sous forte pression.

\* Le terme granulé est ici impropre, on devrait dire chlorure compacté.

Le chlorure convient à tous les sols et à la plupart des cultures. Il est conseillé de l'enfouir deux semaines avant le semis, en évitant de le mettre directement au contact des semences ou des jeunes plantules.

#### ● Le sulfate de potassium

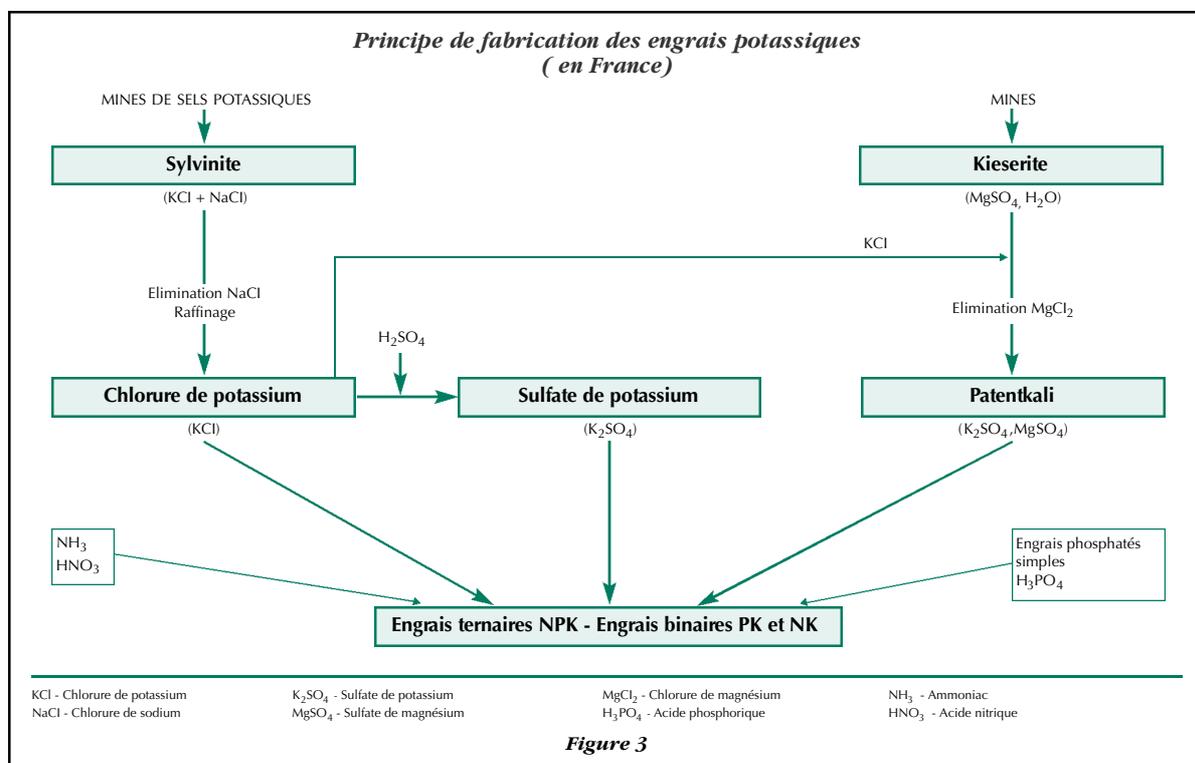
Le sulfate de potassium dosant 50 % d'oxyde de potassium est obtenu par action de l'acide sulfurique sur le chlorure de potassium. Il contient 43 % de  $SO_3$ , d'où son intérêt pour les plantes exigeantes en soufre comme le colza, et moins de 3 % de chlore : de ce fait, il est qualifié d'«engrais pauvre en chlore». Il s'impose pour le tabac, sensible à la présence de chlore. Il est aussi recommandé pour le haricot, le pois, le lin, les vignes à vins fins, les cultures florales...

En raison de sa très faible salinité, il peut être apporté jusqu'au moment du semis.

#### ● Le patentkali

Le patentkali est un sulfate double de potassium et de magnésium qui dose 30 % d'oxyde de potassium, 45 % de  $SO_3$  et 10 % d'oxyde de magnésium. Il est utilisé chaque fois que des carences en magnésium sont à craindre, en particulier sur vignes, pommiers et maïs.

NB : l'oxyde de potassium ( $K_2O$ ) est couramment dénommé «potasse».



---

## **LES ENGRAIS COMPOSÉS**

Une fertilisation rationnelle implique, en général, l'apport à chaque culture d'une fumure associant azote, phosphore et potasse, en une ou plusieurs fois dans l'année.

Pour faciliter les applications d'automne ou de printemps qui portent sur deux ou sur trois éléments fertilisants, l'industrie fabrique, outre les engrais simples comportant un seul élément, des engrais composés contenant au moins deux des trois éléments fertilisants de base.

### **FABRICATION**

Selon les procédés de fabrication, on distingue les engrais composés obtenus par réaction chimique, les engrais de mélange physique après mouture et les engrais de mélange mécanique.

#### ● **Les engrais composés obtenus par réaction chimique entre matières premières et produits intermédiaires :**

phosphates naturels, ammoniac, acides nitrique, sulfurique et phosphorique, chlorure et sulfate de potassium, etc.

On obtient ainsi :

- des engrais ternaires NPK,
- des engrais binaires NP, tels que les phosphates d'ammoniaque (le plus répandu titre 18 % N et 46 %  $P_2O_5$ ) ou les nitrophosphates,
- des engrais binaires NK, tels que le nitrate de potassium (13 % N et 46 %  $K_2O$ ).

Ces engrais composés se présentent, en général, sous forme de produits granulés.

#### ● **Les engrais composés de mélange physique après mouture**

Ils sont obtenus par mélange physique d'engrais simples sous forme solide, introduits à l'état brut, après mouture et tamisage. Les procédés mécaniques utilisés doivent permettre d'obtenir des mélanges de composition homogène et stable.

Cette condition doit être remplie pour qu'ils puissent se prévaloir de la qualité d'engrais composés. Ils sont commercialisés sous forme pulvérulente, compactée, ou granulée.

Parmi les engrais composés de mélange, on distingue essentiellement les engrais ternaires NPK, et les engrais binaires PK, qui sont les plus utilisés comme engrais de fond à l'automne.

Selon la matière première phosphatée associée au sel de potassium, lequel est le plus souvent du chlorure de potassium, on obtient différentes catégories d'engrais composés PK telles que les super-potassiques, les phospho-

potassiques, les scories potassiques, etc.

Les différentes matières premières phosphatées peuvent également être associées entre elles pour obtenir des engrais composés PK tels que les super-phospho-potassiques, super-phospho-potassiques, scories-phospho-potassiques, etc.

#### ● **Les engrais composés de mélange mécanique (dit de «bulk-blending»)**

Ils sont obtenus par mélange mécanique d'engrais simples ou composés, déjà sous forme granulée, perlée ou compactée. Les caractéristiques physiques des matières premières constitutives du mélange devront être les plus semblables possibles pour obtenir une bonne homogénéité de l'engrais, seule garantie d'un bon épandage. Toute manutention peut entraîner des modifications d'homogénéité du produit.

#### ● **Les engrais composés liquides, binaires NP et ternaires NPK :**

##### - *solutions claires :*

Leur densité varie de 1,2 à 1,4 ; leur dosage peut être exprimé aux 100 kilos ou aux 100 litres.

##### - *suspensions :*

Elles permettent d'atteindre des teneurs en éléments fertilisants analogues à celles des engrais ternaires solides les plus concentrés.

Elles sont généralement fabriquées dans des ateliers régionaux qui adaptent les formules aux techniques locales de fertilisation en fonction des cultures, des sols et du climat.

Les engrais en suspension peuvent être additionnés de soufre ou d'oligo-éléments.

Leur épandage implique la mise en oeuvre d'un matériel spécialement adapté.

### **CARACTERISATION DES ENGRAIS COMPOSÉS**

Les engrais binaires PK et les engrais composés azotés ternaires NPK et binaires NP et NK se désignent par leur formule. Celle-ci s'énonce par une série de trois nombres donnant dans l'ordre les teneurs de l'engrais en azote, anhydride phosphorique et oxyde de potassium.

Par exemple :

20-20-0, 17-17-17, 15-11-22, 0-20-20, etc.

Un 15-11-22 contient, aux 100 kilos, 15 kilos d'azote, 11 d'anhydride phosphorique et 22 d'oxyde de potassium.

L'industrie livre un choix varié de formules qui peuvent se grouper par catégories, selon la proportion des éléments entre eux appelée «équilibre». Par exemple, pour les engrais ternaires :

- Les formules 13-13-13, 15-15-15, 17-17-17 appartiennent à l'équilibre 1-1-1.
- Les formules 5-12-12, 10-20-20 appartiennent à l'équilibre 1-2-2.
- Les formules 20-10-10, 22-11-11 appartiennent à l'équilibre 2-1-1.

L'appréciation de la valeur d'un engrais composé doit faire intervenir :

- la concentration, c'est-à-dire la somme des unités fertilisantes aux 100 kilos,
- l'équilibre en NPK, car les éléments n'ont pas la même valeur marchande ni la même action fertilisante,
- la forme sous laquelle se présentent les éléments fertilisants (cf. point 4 ci-après, Législation) :
  - pour N : nitrique, ammoniacale, uréique, cyanamidée ou organique,
  - pour  $P_2O_5$  : soluble eau, soluble dans différents citrates, soluble dans l'acide citrique à 2 % ou soluble dans l'acide formique à 2 %,
  - pour  $K_2O$  : soluble dans l'eau ; pour les cultures qui craignent la présence de chlore, il existe des formules spéciales portant la mention «pauvre en chlore».

La teneur de l'engrais en éléments fertilisants et leurs formes figurent obligatoirement sur l'étiquette des sacs, les documents publicitaires et les factures.

Quand certains constituants phosphatés entrent dans la composition de l'engrais (par exemple, scories Thomas, phosphate naturel, phosphate naturel partiellement solubilisé, phosphate aluminocalcique,...), la dénomination du produit doit le préciser.

## **LES MODALITES D'EMPLOI**

### **Les ternaires et binaires azotés**

#### A l'automne

Les engrais ternaires ne sont employés que dans de rares cas :

- lorsque l'azote est utilisable par la plante sans risque pour l'environnement,
- au semis du colza et des cultures dérobées : pour les semis après le 15-20 septembre, ou après un précédent ayant laissé un faible reliquat d'azote,
- sur prairies temporaires pour favoriser le tallage et l'enracinement.

En sols filtrants ou de faible profondeur, il sera préférable de ne pas apporter d'azote à l'automne, pour mieux le rentabiliser en fin d'hiver et éviter des pertes inutiles dans l'environnement.

#### Au printemps

Les formules de printemps, plus riches en azote, sont épandues soit avant le semis, soit en couverture sur les cultures en place.

Plusieurs cas se présentent :

- la fumure est apportée en une seule fois au moyen de l'engrais ternaire. C'est une solution fréquente pour les plantes sarclées, le tournesol, le maïs et les céréales de printemps; sur céréales d'hiver ou colza, le premier épandage d'azote peut être réalisé avec un engrais ternaire lorsque P et K n'ont pas été apportés à l'automne.
- parfois l'apport d'engrais ternaire au printemps vient en complément d'une fumure d'automne. Il se pratique surtout pour les cultures sarclées, mais aussi pour le blé au tallage et les prairies exploitées de façon intensive. Il a pour but de permettre un meilleur départ de la plante, grâce à l'effet de synergie entre les éléments.

Ces formules à action rapide associent généralement à l'azote et à la potasse des formes «solubles eau» d'anhydride phosphorique, susceptibles d'avoir un coefficient d'utilisation élevé au démarrage de la végétation.

La part des engrais composés NPK, NP et NK dans la fertilisation représente en 1995-96, 32% des éléments fertilisants utilisés sur le territoire français.

#### **Les binaires PK**

Ils sont surtout employés à l'automne, moins souvent au printemps, l'azote étant épandu séparément. La part des binaires PK représente 28 % de la fertilisation totale  $P_2O_5$  et  $K_2O$  au cours de la campagne 1995-96.

## **2 LES ENGRAIS ORGANIQUES ET ORGANO-MINERAUX**

Ces produits offrent l'avantage d'une fourniture lente et progressive d'azote à la plante et peuvent favoriser l'activité microbienne dans le sol.

Ils sont employés surtout pour la fertilisation des cultures spécialisées : vignes, cultures maraichères, florales, cultures sous serre, arbres fruitiers...

Parmi eux, on distingue :

#### **LES ENGRAIS ORGANIQUES AZOTÉS**

obtenus à partir de produits ou sous-produits d'origine animale ou végétale, sans incorporation de matières minérales. Seule leur teneur en azote organique est déclarée. Il s'agit principalement de déchets industriels : cuir, corne, sang, laine, peaux, tourteaux...

---

### **LES ENGRAIS ENTIÈREMENT D'ORIGINE ANIMALE OU VÉGÉTALE (NPK, NP, NK)**

contenant de l'azote organique mais aussi de l'anhydride phosphorique, de l'oxyde de potassium. Ce sont, par exemple, les guanos, les poudres d'os vert, les fientes de volaille déshydratées, les vinasses de mélasse de betterave.

### **LES ENGRAIS ORGANO-MINÉRAUX (N, NPK, NP, NK)**

associant les produits cités aux deux paragraphes précédents à des matières fertilisantes minérales.

Ces deux dernières catégories de produits doivent contenir au minimum 1 % d'azote organique.

### **3 LES ENGRAIS SPÉCIAUX AVEC ADDITIFS**

#### **LES FORMULES SPÉCIALES ADDITIONNÉES D'OLIGO-ÉLÉMENTS**

Elles sont fabriquées pour combattre des carences bien caractérisées : par exemple carences en zinc ou en cuivre sur maïs, ou en bore sur betterave.

### **LES SOLUBLES**

Ce sont des sels purs utilisés en irrigation fertilisante et en culture hydroponique sous serre.

### **4 LEGISLATION : ASPECTS PRATIQUES**

La commercialisation des engrais est régie par la loi du 13 juillet 1979 relative à l'organisation du contrôle des matières fertilisantes et des supports de culture.

Cette loi établit un système de contrôle et impose comme règle générale l'homologation des produits mis sur le marché, à l'exception de ceux entrant dans des normes françaises rendues d'application obligatoire ou couverts par les directives de l'Union Européenne, qui eux, sont commercialisés en se référant à ces normes ou directives.

Le domaine d'application de la loi comprend :

- les engrais contenant des éléments fertilisants majeurs (N, P, K) et/ou secondaires (S, Ca, Mg, Na) et/ou des oligo-éléments (Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo, Co),
- les amendements (calcaïques et/ou magnésiens, organiques),



Vue d'ensemble de la plate-forme chimique de Grand Quevilly.

- les matières fertilisantes mixtes contenant des amendements et des engrais,
- les supports de culture,

d'une façon générale, tous les produits dont l'emploi est destiné à assurer ou à améliorer la nutrition des végétaux ainsi que les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols.

Les textes réglementaires pris pour l'application de la loi établissent les spécifications de composition des produits (formes et teneurs minimales en éléments fertilisants), les modalités de marquage des emballages et les contrôles à effectuer. Les normes françaises d'application obligatoire et les directives de l'Union européenne transcrites en droit français font partie de ces textes réglementaires.

L'homologation (ou l'autorisation provisoire de vente) des produits, ainsi que les normes françaises, permettent la mise sur le marché d'engrais sur le territoire français.

Les directives permettent la mise sur le marché d'engrais sur le territoire de l'Union européenne (engrais CEE).

Les normes françaises en vigueur sont les suivantes :

**NF U 42-001** et ses additifs et modificatifs concernant les engrais.

**NF U 42-002** (parties 1 et 2) et **NF U 42-003** (parties 1 et 2) concernant les engrais contenant des oligo-éléments.

**NF U 44-001** concernant les amendements calciques et/ou magnésiens.

**NF U 44-203** concernant les produits mixtes issus d'amendements calciques et/ou magnésiens et d'engrais.

**NF U 44-051** concernant les amendements organiques.

**NF U 44-071** concernant les produits mixtes issus d'amendements organiques et d'engrais.

**NF U 44-551** concernant les supports de culture.

Les directives CE comprennent essentiellement les textes du 18 décembre 1975 (76/116/CEE) et du 15 juillet 1980 (80/876/CEE) relatifs aux engrais, complétés par des dispositions concernant les éléments secondaires (89/284/CEE), les oligo-éléments (89/530/CEE), et des engrais divers ou spéciaux (93/69/CEE).

Pour l'identification des engrais, des matières fertilisantes et des supports de culture, les emballages, les étiquettes ou les documents qui accompagnent les livraisons en vrac portent les mentions légales prévues dans les textes d'application, les normes françaises ou les directives CE. Ces mentions sont, par exemple, la dénomination du type d'engrais, la teneur déclarée en chaque élément fertilisant contenu, la forme sous laquelle se présentent ces éléments et leur solubilité, la finesse de mouture du produit, etc. Les mentions sont de deux ordres : obligatoires ou facultatives. Toutes sont prévues pour renseigner de façon pratique et loyale l'acheteur et l'utilisateur des matières fertilisantes. Ces mentions sont reportées sur les factures de façon à commercialiser les produits sans ambiguïté.

EXEMPLES DE DENOMINATIONS, SPECIFICATIONS, ET MODES DE DECLARATIONS PREVUS PAR LA REGLEMENTATION :

● **Engrais azotés simples**

La teneur est exprimée en azote (N) en % en masse du produit brut.

DÉNOMINATIONS	TENEUR MINIMALE EN AZOTE N ET AUTRES EXIGENCES	MODES DE DÉCLARATION DE N
<b>Ammonitrate</b>	20 % exigences particulières pour ammonitrate ayant une teneur en N > 28 %	% N total dont : % N nitrique % N ammoniacal
<b>Urée</b>	44 % Pas plus de 1,2 % de biuret	% N total exprimé en % N uréique
<b>Solution azotée (1)</b>	15 %	% N total dont % N nitrique % N ammoniacal % N uréique si chacune de ces trois formes atteint une teneur de 1%
<b>Sulfate d'ammoniaque (1)</b>	20 %	% N ammoniacal
<b>Nitrate de chaux et de magnésie (2)</b>	13 % et 5 % d'oxyde de magnésium soluble dans l'eau	% N nitrique

(1) Déclaration facultative du taux d'anhydride sulfurique (SO<sub>3</sub>) soluble dans l'eau. Ce taux doit être d'au moins 8 % pour la solution azotée répondant à la norme NF U42-001.

(2) Déclaration obligatoire de l'oxyde de magnésium (MgO) soluble dans l'eau.

● **Engrais phosphatés simples**

La teneur est exprimée en anhydride phosphorique ( $P_2O_5$ ) en % en masse de produit brut.

Les divers engrais phosphatés sont caractérisés par leur solubilité dans des réactifs spécifiques ; pour certains d'entre eux on exige de plus une certaine finesse de mouture.

DÉNOMINATIONS	TENEUR MINIMALE EN $P_2O_5$ ET AUTRES EXIGENCES	MODES DE DÉCLARATION $P_2O_5$
<b>Superphosphate triple</b>	38 % $P_2O_5$ soluble dans le citrate d'ammonium neutre. 90 % au moins du $P_2O_5$ déclaré soluble dans ce réactif doit être soluble dans l'eau.	% $P_2O_5$ soluble dans le citrate d'ammonium neutre % $P_2O_5$ soluble dans l'eau
<b>Phosphate bicalcique</b>	38 % $P_2O_5$ soluble dans le citrate d'ammonium alcalin (Petermann). 90 % du produit passe au tamis de maille 0,160 mm. 98 % du produit passe au tamis de maille 0,630 mm.	% $P_2O_5$ soluble dans le citrate d'ammonium alcalin.(Petermann)
<b>Scories Thomas</b>	12% $P_2O_5$ total (*). 75 % au moins du $P_2O_5$ total déclaré doit être soluble dans l'acide citrique à 2%. 75% du produit passe au tamis de maille 0,160 mm. 96% du produit passe au tamis de maille 0,630 mm.	% $P_2O_5$ total dont % $P_2O_5$ soluble dans l'acide citrique à 2 %.
<b>Phosphate naturel tendre fin</b>	25% $P_2O_5$ total (*). 55% au moins du $P_2O_5$ total déclaré doit être soluble dans l'acide formique à 2%. 90% du produit passe au tamis de maille 0,063 mm. 99% du produit passe au tamis de maille 0,125 mm.	% $P_2O_5$ total et % $P_2O_5$ soluble dans l'acide formique à 2 %.

(\*) L'anhydride phosphorique ( $P_2O_5$ ) total est celui soluble dans les acides minéraux.

● **Engrais potassiques simples**

La teneur est exprimée en oxyde de potassium ( $K_2O$ ) en % en masse de produit brut.

DÉNOMINATIONS	TENEUR MINIMALE EN $K_2O$ ET AUTRES EXIGENCES	MODES DE DÉCLARATION $K_2O$
<b>Chlorure de potassium</b>	37 % $K_2O$ soluble dans l'eau	% $K_2O$ soluble dans l'eau
<b>Sulfate de potassium</b>	47 % $K_2O$ soluble dans l'eau Pas plus de 3 % de chlore (Cl)	% $K_2O$ soluble dans l'eau (*)

(\*) Autre déclaration obligatoire : %  $SO_3$  soluble dans l'eau. Déclaration facultative : teneur maximale en chlore (Cl).

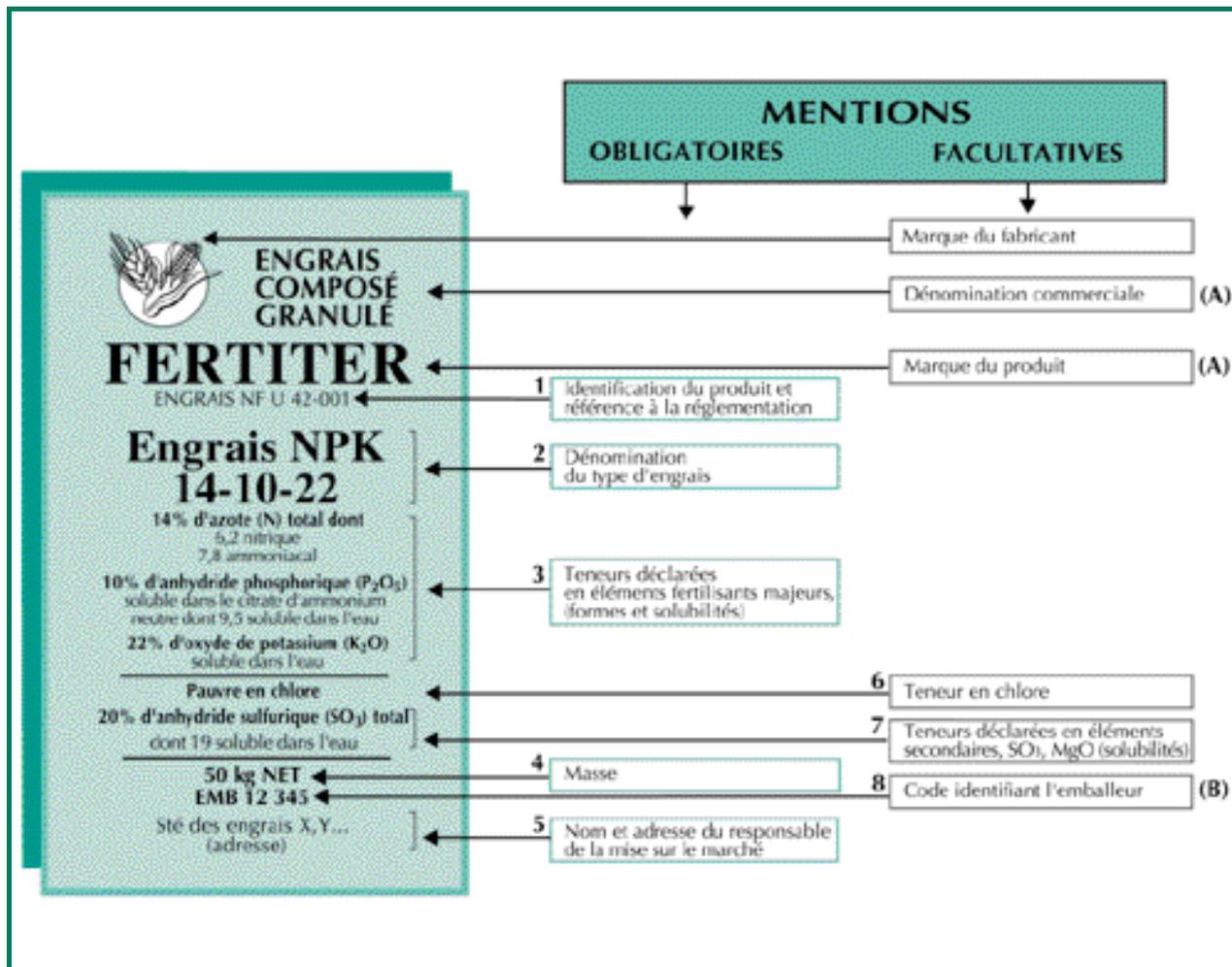
● **Engrais composés (NPK, NP, PK, NK)**

La déclaration des éléments fertilisants est faite selon le même principe que pour chacun des engrais simples azotés, phosphatés et potassiques.

Des modes de déclaration particuliers sont prévus selon que l'engrais composé contient un ou plusieurs constituants phosphatés (voir NF U 42-001 «tableau complémentaire concernant la composante phosphatée» et directive 76/116/CEE «engrais composés. Indications pour l'identification des engrais.»)

Les engrais composés organo-minéraux doivent contenir au moins 1 % d'azote organique d'origine animale ou végétale mais pas d'azote de synthèse organique. Cette dernière forme d'azote entre dans la composition d'une catégorie particulière appelée «engrais azotés, engrais composés contenant de l'azote de synthèse organique». Ces engrais contenant de l'azote de synthèse organique sont dénommés et spécifiés dans l'additif 2 à la Norme NF U 42-001, et dans les annexes I et II de la Directive 93/69/CEE.

## COMMENT LIRE UNE ETIQUETTE



La numérotation 1 à 7 correspond à l'ordre de priorité dans lequel les mentions doivent être indiquées selon la norme servant de référence.

(A) « Marque du produit et dénomination commerciale », mention facultatives, doivent être nettement séparées de la « dénomination de type » figurant en tant que mentions obligatoire.

(B) Mentions obligatoire lorsque l'adresse de l'atelier de mise en sac et de pesée n'est pas celle du responsable de la mise sur le marché.

# les Engrais

## STOCKAGE - MANUTENTION - ÉPANDAGE

Après avoir choisi ses engrais, l'agriculteur doit se préoccuper de leur mise en oeuvre. Ceci revient à répondre aux questions suivantes :

- Quand acheter les engrais ?
- Comment les stocker ?
- Comment les transporter du lieu de stockage jusqu'au champ ?
- Comment les épandre ?

### 1 L'ÉPOQUE D'ACHAT DES ENGRAIS

Ce sont des considérations pratiques (possibilités de stockage, assurance d'avoir le type d'engrais voulu au moment opportun) et économiques (prix, conditions de paiement) qui doivent guider l'exploitant dans le choix de l'époque d'achat des engrais.

### 2 STOCKAGE A LA FERME

#### ENGRAIS SOLIDES

L'exploitant peut recevoir ses engrais en sacs ou en vrac. Jusqu'à 15/20 tonnes manutentionnées par travailleur agricole et par an, le vrac ne s'impose pas. Au-dessus de 50 tonnes, le vrac est recommandé. Entre les deux, le sac de grande contenance est souvent une solution intéressante.

#### SACS

La généralisation de l'emploi des sacs plastiques soudés conduit à une simplification des conditions de stockage. Bien qu'il soit possible de stocker ces sacs en plein air pendant quelques semaines, recouverts d'une bâche plastique pour les protéger de la pluie et du rayonnement solaire, il est préférable de les abriter dans un local sain, en les isolant du sol et des murs, afin d'éviter les écarts d'hygrométrie importants et les attaques de rongeurs.

#### ● Sacs de 50 kg, libres ou sur palettes

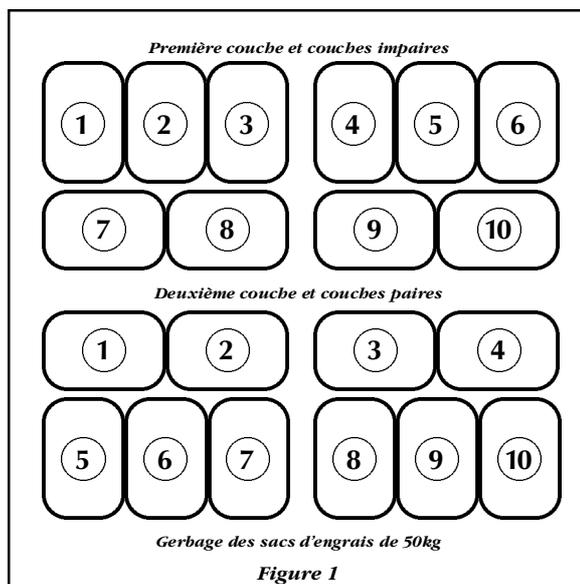
Pour mieux arrimer les tas, dont la hauteur ne doit pas dépasser 10 à 13 couches, les sacs seront placés les uns sur les autres en alternant le sens de leur dimension principale (fig. 1)

L'intérêt de la palettisation a amené un développement important de ce conditionnement. Afin d'éviter une rupture dans la chaîne de distribution, l'engrais peut être livré sur palettes aux agriculteurs. Le stockage à la ferme peut alors

revêtir des formes différentes : stockage classique sous hangar, sur palettes, ou sur remorques plateaux, etc.

#### ● Sacs de grande contenance (500 kg)

Ils permettent un gain de temps tout en supprimant les manutentions pénibles. Ce mode de conditionnement représente, par rapport au vrac, une importante économie d'investissement en matière de manutention et de stockage.



#### VRAC

A la ferme, le vrac se justifie à partir de 50 tonnes environ, en 3 formules au plus. Le stockage peut se faire dans des trémies surélevées, ou en cases installées dans un magasin, à l'abri de l'humidité, d'accès facile, avec des dégagements et une hauteur suffisante pour faciliter les opérations de livraison et de reprise de l'engrais.



Sac de 500 kg

## **ENGRAIS LIQUIDES**

### ● Solutions claires

Les engrais liquides sont stockés dans des cuves de 15 000 à 50 000 litres, en acier ordinaire ou inoxydable ou en plastique renforcé, ou même en plastique souple. Les citernes en acier ordinaire sont enduites intérieurement d'un revêtement anti-corrosion. Il existe également des cuves de 3 000 litres, généralement en matière plastique, destinées à un stockage de courte durée ou au transfert de l'engrais jusqu'au champ.

Les stockages de moins de 100 m<sup>3</sup> sont soumis aux règlements sanitaires départementaux lorsqu'ils le prévoient. Au-delà de 100 m<sup>3</sup>, ils sont soumis à autorisation. Dans tous les cas, il est conseillé de prévoir des cuves de rétention pour éviter des pollutions accidentelles.

### ● Engrais en suspension

Leur stockage nécessite un dispositif de brassage régulier à intervalles de quelques jours au moyen de rampes d'air comprimé.

Le plus souvent, c'est la station distributrice régionale qui assure le stockage des produits de base et la préparation des formules peu de temps avant leur emploi.

## **ENGRAIS GAZEUX**

Le stockage de l'ammoniac anhydre à la ferme ne se justifie que pour les exploitations d'au moins 100 hectares. Il doit respecter des conditions réglementaires strictes pour sa mise en place et son exploitation.

La reprise du vrac stocké à la ferme implique le plus souvent le chargement des remorques au moyen d'une pelle à tracteur, d'une sautelette ou d'une vis sans fin, ou parfois par simple gravité.

Divers accessoires adaptables à du matériel courant permettent d'éviter le déchargement manuel de l'engrais de la remorque dans l'épandeur.

## **ENGRAIS LIQUIDES**

Solutions claires azotées ou composées (NP surtout) ou suspensions (NPK) se transvasent facilement par pompes et tuyaux, des citernes aux appareils d'épandage. Comme pour les épandeurs d'engrais solides, il convient d'éviter les grippages et la corrosion, en utilisant du matériel adapté, en vidant et rinçant les appareils et surtout les pompes après chaque période d'utilisation.



*Remplissage d'un distributeur d'engrais sans intervention manuelle.*

## **3 MANUTENTION**

### **ENGRAIS SOLIDES EN SACS**

Ceux-ci sont le plus souvent transportés manuellement du magasin à la remorque, puis à l'épandeur, ce qui implique des efforts physiques pénibles de la part d'une main-d'oeuvre en diminution.

La manutention de sacs de grande contenance ou de palettes de sacs permet de résoudre ce problème si l'agriculteur s'équipe d'appareils de levage adaptables sur tracteur.

### **ENGRAIS SOLIDES EN VRAC**

L'utilisateur du vrac peut s'approvisionner directement auprès du distributeur, soit à son magasin, soit à partir de silos surélevés d'où l'engrais tombe par gravité dans la remorque. Cette solution n'est valable que pour de faibles distances entre le point d'approvisionnement et le champ (pas plus d'un kilomètre par tonne d'engrais transportée).



*Transport d'engrais sur palettes de la ferme au champ.*

---

### **AMMONIAC ANHYDRE**

L'ammoniac anhydre est transporté du point de stockage jusqu'au champ en utilisant le plus souvent un réservoir mobile de 2 ou 4 tonnes. Le transvasement de l'ammoniac s'effectue sous forme liquide en créant une surpression dans la citerne à vider à l'aide d'un compresseur de gaz ammoniac.

## **4 EPANDAGE**

Dans de nombreuses régions, l'agriculteur a maintenant le choix entre deux possibilités :

- soit épandre lui-même ses engrais
- soit faire appel à un distributeur ou à un entrepreneur de travaux agricoles ; son engrais sera alors « rendu racines ».

### **EPANDAGE PAR LES MOYENS DE L'AGRICULTEUR**

Les engrais solides pulvérulents sont souvent épandus avec un distributeur en nappe (fond mouvant, assiettes, etc.), les granulés avec des appareils centrifuges ou pneumatiques, les liquides avec un pulvérisateur équipé de pièces anticorrosion ou par enfouissement au moyen d'un appareil de type « canadien » ; l'ammoniac est placé dans le sol au moyen de dents injectrices reliées à un réservoir éprouvé à 30 bars de pression.

L'organisation du chantier suppose un remplissage rapide des appareils, un approvisionnement régulier en engrais et, dans de nombreux cas, un jalonnement du champ. L'épandage des engrais intervenant le plus souvent à des périodes où il importe de profiter au maximum de l'état favorable du sol, les temps morts devront être aussi réduits que possible.

### **ENGRAIS «RENDU RACINES»**

Certains distributeurs et entrepreneurs de travaux agricoles proposent à l'agriculteur de le libérer du travail d'épandage de ses engrais.

Des appareils de grande capacité et de grande largeur, souvent mis au point avec le concours des producteurs d'engrais, permettent de réaliser ces épandages en un minimum de temps.

Les binaires PK, les engrais en suspension, l'ammoniac anhydre ainsi que les amendements calciques et magnésiens sont jusqu'à présent les produits qui ont le plus bénéficié de la technique du « rendu racines ».

### **LA QUALITE DE L'EPANDAGE**

Quelle que soit la solution retenue, épandage par ses propres moyens ou par entreprise, l'agriculteur doit accorder le plus grand soin à cette dernière étape de la fertilisation : un épandage précis et régulier.

En effet, à quoi bon calculer à l'unité près les quantités d'engrais à partir des analyses de sol et des objectifs de rendements si, après épandage, on s'aperçoit que la quantité apportée correspond à  $\pm 10 - 15$  % près à la dose calculée et que, de surcroît, cet engrais est irrégulièrement épandu avec un coefficient de variation moyen de 20 à 25 % (ce qui peut arriver selon les enquêtes effectuées par le CEMAGREF).

Un sous-dosage, global ou ponctuel, notamment en azote, entraîne une perte de rendement.

Un sur-dosage, global ou ponctuel, n'entraîne pas d'augmentation de rendement et parfois même une diminution (verse des céréales à paille) ; en plus, ces zones surdosées sont, dans le cas de l'azote, potentiellement polluantes. Il y a donc risque économique pour l'agriculteur, et risque écologique pour l'environnement.

Ce point revêt une telle importance qu'il fait l'objet, tant pour les engrais de synthèse que pour les déjections animales, d'un chapitre spécial dans le « Code de bonnes pratiques agricoles » du CORPEN (Cf. Chapitre XIII).

Un épandage précis et régulier sur le champ, avec répartition homogène et conservation du titre en tout point de la parcelle, dépend :

- des caractéristiques physiques des engrais,
- de leur maintien au stockage et au transfert,
- des caractéristiques des appareils distributeurs,
- de la technique mise en oeuvre par l'utilisateur.

(Voir document CEMAGREF-COMIFER : « Épandage d'engrais minéraux solides » - Conseils pratiques pour bien épandre - contrôle au champ).

#### **● L'engrais**

Si, au plan chimique, les engrais doivent répondre à des normes strictes (cf. paragraphe Législation p. 57), leurs caractéristiques physiques peuvent être très variables et cela a des conséquences importantes sur l'épandage, en quantité et régularité.

L'agriculteur devra choisir des engrais de qualités physiques correctes : densité apparente connue, granulométrie régulière (pas de poussière), sphéricité la meilleure possible, dureté suffisante pour permettre des épandages à grande largeur, etc.

L'achat d'un engrais « moins cher », mais ne correspondant pas à ces critères physiques très précis, peut coûter en fait

plus cher à l'agriculteur, par les défauts d'épandage qu'il provoquera inévitablement.

Enfin, veiller aux bonnes conditions de stockage.

### ● L'épandeur

Chaque appareil ayant un comportement spécifique en fonction du type d'engrais, il est nécessaire de procéder à un réglage minutieux pour les différents engrais, et selon les conditions climatiques du moment.

Non seulement la dose/hectare sera contrôlée, mais l'inclinaison, l'horizontalité, la hauteur d'éjection seront vérifiées. La répartition longitudinale (dans le sens d'avancement) sera conditionnée par une vitesse d'avancement constante. La répartition transversale devra être aussi contrôlée : procéder à un jalonnement rigoureux des parcelles - vérifier la qualité du recouvrement.

Enfin, les appareils devront être entretenus en permanence: vider et nettoyer le distributeur après chaque épandage.

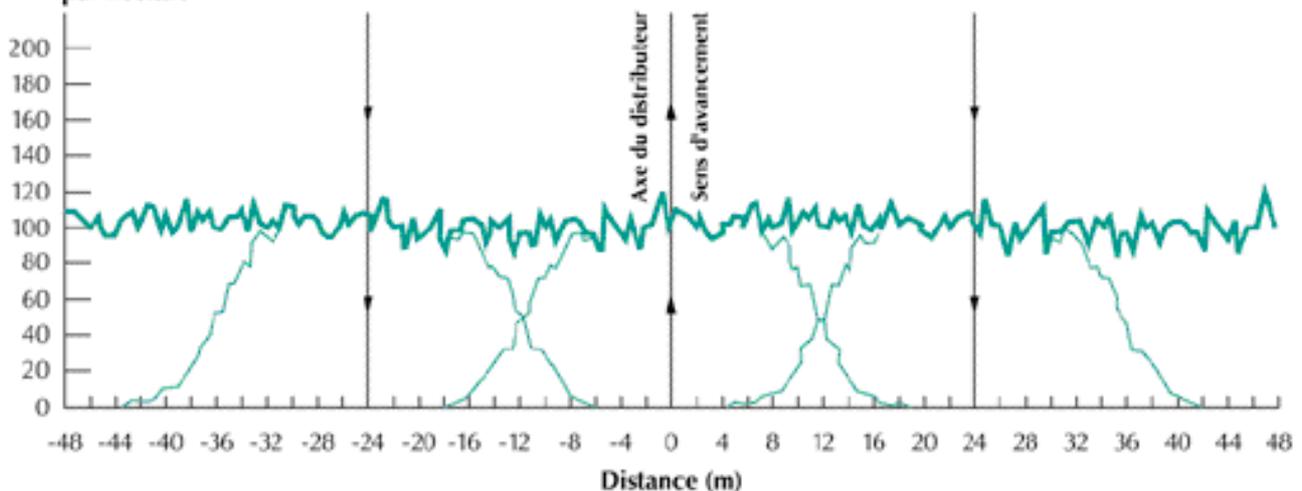


*Epandeur d'engrais*

#### REGULARITE DE LA DISTRIBUTION TRANSVERSALE DE L'AMMONITRATE 33,5 GRANULE, MESUREE EN EPANDAGE CENTRIFUGE SUR 24 M

- la courbe en gras prend en compte les recouvrements entre passages.
- chaque courbe en trait fin représente la distribution obtenue avec 1 passage.

Dose d'engrais  
exprimée en pourcentage  
de la dose moyenne  
par hectare



*Essai réalisé en ball d'expérimentation à Montoldre (03) par le CEMAGREF le 12/01/89.  
Ammonitrate 33,5 granulé Hydro Azote de densité 0,98 - dose obtenue: 340kg/ba - coefficient de variation: 5,43%*

*Figure 2*

# Le Plan de Fumure

## 1 SES BUTS

Le plan de fumure a pour buts de :

- chiffrer annuellement, pour chacune des cultures en place ou prévues sur l'exploitation, les besoins en éléments fertilisants tels qu'ils résultent d'une bonne application des règles de la fertilisation raisonnée (cf. chapitres VI, VII et VIII). C'est le plan de fumure prévisionnel.
- vérifier, une fois les récoltes effectuées, que le bilan cultural [F-E (Fertilisation moins Exportation)], pour les différents éléments fertilisants, a bien été équilibré, de façon à conserver, voire améliorer, les potentiels de production des différents types de sol de l'exploitation. C'est le «plan de fumure-contrôlé», effectué en fin de rotation, et complété tous les 4-5 ans par des analyses de sol et éventuellement de plantes.
- avoir au début de chaque année ou campagne agricole, des données aussi précises que possible concernant «le poste fertilisation», pour établir un budget prévisionnel de l'exploitation.
- Assurer l'approvisionnement annuel de l'exploitation en engrais en les commandant aux meilleures conditions pour disposer de produits adaptés, au moment opportun.

## 2 LES DONNEES DE BASE DU RAISONNEMENT

L'agriculteur doit faire intervenir dans le raisonnement de son plan de fumure des données agronomiques, pratiques, économiques et financières, propres à son exploitation.

### LES CRITERES AGRONOMIQUES

- L'exploitation agricole doit être divisée en secteurs homogènes ou tout au moins comparables, afin de déterminer pour chacun d'eux les types de production possibles et des objectifs de rendement réalistes.
- Dans la même exploitation, il peut ainsi être défini plusieurs assolements et donc plusieurs rotations, pour lesquels la fertilisation sera conduite de façon différente en fonction des plantes, de la nature du sol, et de son potentiel de rendement.

### LA PLANTE ET SES BESOINS

- Chaque type de plante a des exigences particulières pour tel ou tel élément. La composition du végétal, connue par analyse, permet de déterminer les **exportations** en éléments

fertilisants pour chacune des cultures, par quintal de produit et, en fonction du rendement obtenu, par hectare cultivé. Ces quantités d'éléments sont soustraites de la parcelle par les récoltes et éventuellement par leurs sous-produits, pailles, verts de betteraves, etc., s'ils sont enlevés du champ (Exportations E).

- Mais au cours de sa végétation, la plante prélève au sol plus d'éléments nutritifs qu'il n'en sera exporté par la récolte. Ces **prélèvements** représentent le besoin global en éléments minéraux dont la culture doit aisément disposer dans le sol pendant tout son cycle végétatif.

- La différence entre prélèvements et exportations correspond aux résidus de récoltes, racines, feuilles, tiges qui restent en principe au sol, mais des pertes diminuent l'importance de ces restitutions : brûlage des pailles, ruissellement, entraînement des débris végétaux à la surface du sol hors de la parcelle...

- De plus, les plantes ont des **besoins instantanés** dont l'importance n'apparaît pas dans la notion de besoin global. Pour cette raison, la dynamique de l'alimentation minérale des végétaux prend souvent plus d'importance que le bilan cultural F-E.

- En effet, à certaines périodes du cycle végétatif, au cours de la croissance intense à forte production de matière sèche ou du développement de certains organes, la plante prélève de très fortes quantités d'éléments minéraux en un temps très court. Le fractionnement et le niveau des apports doivent être calculés pour correspondre le mieux possible aux besoins de la plante au fur et à mesure qu'ils se manifestent.

- Différentes méthodes, souvent utilisées sur vigne et arbres fruitiers (diagnostic foliaire, analyse de sève...), tendent à se généraliser sur d'autres cultures (analyses des plantes ou d'extraits de sève sur blé ou maïs). Elles permettent de contrôler l'alimentation minérale des végétaux, et fournissent des indications pour établir le niveau et l'équilibre des fumures.

### LE SOL, SA NATURE ET SA RICHESSE

- L'analyse physique (granulométrie) donne des indications utiles pour le choix des productions possibles sous un climat déterminé. Elle permet de décider de la nature et de l'importance des différentes cultures de l'exploitation, de leur répartition dans l'espace et donc de l'assolement global de l'exploitation. Elle indique également les techniques culturales qui devront être appliquées : travail du sol, dates de semis, modalités d'épandage des fertilisants.

- 
- Les résultats de l'analyse chimique permettent d'apprécier la fertilité du sol, de contrôler éventuellement son appauvrissement ou son enrichissement (bilan analytique).

### **LES OBJECTIFS DE RENDEMENTS**

- La connaissance du sol, parcelle par parcelle, permet à l'agriculteur de déterminer les cultures les mieux adaptées à son exploitation. En fonction des données climatiques, il peut se fixer des objectifs de rendement dont dépendra le niveau de fertilisation.
- Le climat joue un rôle important dans l'expression du potentiel des cultures : température, pluviométrie peuvent être les facteurs limitants du rendement. Il intervient aussi dans la dynamique des éléments fertilisants et notamment dans la minéralisation de la matière organique et la migration des éléments dans le sol. En cas de forte pluviosité, le lessivage de l'azote surtout, mais aussi de la potasse, du soufre, du calcium..., modifie les modalités d'apport des engrais.
- Pour fixer des objectifs de rendements réalistes, l'agriculteur doit prendre en compte :
  - les données agro-climatiques de son exploitation : pluie, drainage, irrigation,...
  - les références régionales, issues d'expérimentations et observations locales faites dans des conditions de milieu identiques et avec le même type de rotation,
  - l'itinéraire cultural choisi : cultures, espèces, variétés, travail du sol, dates de semis, protection sanitaire, etc.

### **CALCUL DE LA FUMURE**

L'analyse de toutes ces données conduit au calcul des besoins de l'exploitation en éléments fertilisants. La démarche, pour ce calcul, comporte plusieurs phases :

- Connaissance de la quantité d'unités fertilisantes à prendre en compte par unité de rendement :
  - pour l'azote, c'est la quantité présente par unité de rendement quand la fumure azotée est optimale (éventuellement obtenue dans les expérimentations locales). En fonction des conditions de l'année, un ajustement pourra être effectué en cours de végétation,
  - pour le phosphore et la potasse, ce sont les exportations,
  - pour les oligo-éléments, les quantités à apporter vont dépendre surtout des techniques choisies pour la mise en oeuvre de cette fertilisation : au sol ou en foliaire (notion de quantité minimum efficace).
- Calcul des besoins à l'hectare :
  - pour chacune des cultures de l'assolement, il faut

multiplier les besoins unitaires en N, et les exportations en  $P_2O_5$  et  $K_2O$ , par l'objectif de rendement, pour obtenir la quantité d'éléments fertilisants à mettre en oeuvre. Pour le  $P_2O_5$  et le  $K_2O$ , il faut en plus tenir compte de l'exigence des cultures et de la biodisponibilité de chacun de ces deux éléments dans le sol pour estimer les besoins à l'hectare.

- Restitutions organiques, reliquats et résidus du précédent, pertes, dans le cas de la fumure azotée.

Les quantités calculées pour l'azote correspondent aux besoins des plantes pour assurer leur cycle végétatif et leur production. De ces quantités totales, pour le calcul de la fumure, il faut :

- déduire les quantités d'éléments fertilisants qui seront libérées par la minéralisation de la matière organique. Dans les exploitations d'élevage, les fumiers et lisiers apportent des quantités notables d'éléments fertilisants.
- déduire les reliquats des cultures précédentes si l'objectif de rendement n'a pas été atteint, ainsi que les quantités d'éléments fertilisants restituées au sol par les résidus de cultures : pailles enfouies, racines, verts de betteraves, etc.

Les précédents culturaux, leurs rendements, leurs fumures et les résidus (enfouis) qu'ils laissent éventuellement, interviennent pour fixer les doses d'azote.

- Fumures phosphatée et potassique, une nouvelle stratégie.

Le COMIFER (cf. chapitres VII et VIII) propose que les fumures phosphatée et potassique soient raisonnées en fonction :

- de la culture et de son exigence vis-à-vis de P et de K,
- de l'importance de la réserve biodisponible du sol, de son aptitude à alimenter les plantes et de la capacité du sol à maintenir constante cette fourniture,
- des fertilisations des précédents (bilan cultural F-E), corrigées par le pouvoir fixateur du sol,
- des conditions rencontrées par les racines des plantes pour accéder aux engrais et à la réserve biodisponible (état structural du sol par exemple).

Seule la prise en compte de toutes ces conditions permet de pratiquer un raisonnement sûr des fertilisations phosphatée et potassique, assurant une nutrition satisfaisante des plantes et une gestion optimale des intrants.

Ce concept pourra évoluer dans l'avenir ; en tout cas, il devra être adapté localement en fonction des objectifs de production et des conditions pédoclimatiques (voir

---

document COMIFER : Fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures, novembre 1993).

### **LES CRITERES AGRONOMIQUES**

#### LE CHOIX DES ENGRAIS

Dans la pratique, le choix des engrais tient compte de la nature des cultures, du sol qui les porte, des dates et modalités d'épandage selon la main-d'oeuvre et le matériel disponibles sur l'exploitation.

La fumure a été calculée en éléments fertilisants. Or, selon la forme choisie, les engrais (principalement phosphatés) auront un coefficient d'utilisation plus ou moins élevé.

On adoptera les formes les plus solubles pour les apports se situant au moment de la période d'utilisation :

- en couverture sur blé d'hiver,
- en début de végétation sur prairie,
- sur labour avant semis pour une culture de printemps.

Sur certaines cultures, la potasse sera épandue sous forme de sulfate (cf. Chapitre VIII).

Pour les engrais phosphatés principalement, le choix de la forme dépend de la biodisponibilité en phosphore du sol ainsi que de son pH.

#### LES MODALITES D'APPORTS

L'agriculteur peut avoir le choix des modalités d'apports :

##### ● **En totalité à l'automne avant labour**

La couche profonde du sol se trouve enrichie en P et K, ce qui permet une meilleure alimentation des racines qui se répartissent dans le profil. Enfouie par le labour, cette fumure est partiellement utilisée par la culture qui suit l'épandage. C'est la formule choisie de préférence en tête d'assolement pour des cultures exigeantes.

Sauf cas particuliers, les apports d'azote à l'automne sont généralement déconseillés (efficacité moindre et risque de pollution).

##### ● **En totalité au printemps avec l'azote**

Une culture, dont le précédent a reçu une fumure P et K importante, peut ne recevoir qu'une fumure complémentaire, épandue au printemps le plus près possible de la période de forte utilisation et sous forme immédiatement assimilable.

##### ● **En fractionnant partie à l'automne, partie au printemps**

Les apports annuels et fractionnés de P et K permettent de bénéficier d'un coefficient d'utilisation plus élevé des engrais qui viennent d'être appliqués, puisqu'ils se trouvent à proximité des racines au moment où la plante en a besoin.

De façon générale, on s'oriente vers des apports annuels à la culture, le plus près possible des besoins importants de celle-ci sous forme rapidement assimilable.

#### LES CONTRAINTES PRATIQUES ET ECONOMIQUES

L'agriculteur tiendra compte de la main-d'oeuvre disponible et de l'organisation de son travail (périodes de pointe) pour choisir une catégorie d'engrais simples, binaires ou ternaires, livrés en sacs de 50 kilos, de 500 kilos ou en vrac. Selon le matériel dont il dispose pour le stockage et l'épandage, il choisira des engrais solides ou liquides.

Sur le plan économique, les engrais ont un poids important dans l'exploitation. Il faut donc étudier les conditions d'approvisionnement : date de commande, date de paiement, intérêt du stockage.

Un engrais moins coûteux à l'achat peut cependant revenir plus cher une fois utilisé (cf. qualité des engrais dans chapitre X)

Or, c'est l'efficacité de l'engrais épandu qui doit être prise en compte par l'agriculteur.

En cas de difficulté de trésorerie, l'agriculteur a intérêt à bien fertiliser les cultures à revenu brut élevé plutôt que de procéder à un saupoudrage de l'ensemble de l'exploitation.

Pour bénéficier de conditions intéressantes, il veillera à ne pas disperser son approvisionnement entre un trop grand nombre de formules. Trois à cinq types d'engrais sont généralement suffisants sur une exploitation classique : souvent, un engrais azoté simple, un engrais binaire PK enfoui par labour d'automne, et une ou deux formules d'engrais ternaires NPK pour application de printemps.

Le poste engrais représente une part importante du prix de revient des principales cultures. Il est donc essentiel d'épandre les engrais avec précision, surtout quand il s'agit d'engrais azotés (voir document COMIFER : Epandage d'engrais minéraux solides).

## **3 CONCLUSIONS**

Il faut rechercher un compromis entre le modèle théorique et l'application pratique.

S'il ne fait appel qu'à un nombre limité de formules d'engrais, l'agriculteur ne pourra généralement pas apporter exactement à chacune de ses cultures les quantités exactes obtenues par le calcul de la fumure.

Dans son approvisionnement, il devra rechercher un compromis entre la fumure réellement appliquée à chacune des cultures de l'assolement conformément au tableau 2, et

le modèle agronomique qu'il a établi selon le tableau 1.

Mais, c'est au niveau de la rotation qu'il importe de retrouver une bonne correspondance entre les éléments fertilisants apportés et ceux qui avaient été prévus. Ce contrôle a posteriori, en fin de rotation, est un facteur essentiel de l'application du plan de fumure.

De nombreux outils d'aide à la décision existent pour permettre aux agriculteurs et techniciens d'établir leurs plans de fumure. Ce sont les logiciels-fertilisation, faisant suite ou non aux analyses de sols, concernant les trois éléments majeurs NPK. Certains vont jusqu'au choix des engrais compte tenu des conditions de prix du moment.

Citons à titre d'exemples : IPAS, PC Fumure, Clé de sol, Azobil, Top-Az, Point Total.

*Avant d'épandre les engrais,  
il faut raisonner le plan de fumure*



**Tableau 1 - Besoins en éléments fertilisants**

CULTURE	SURFACE	FUMURE organique	OBJECTIF DE rendement	A L'HECTARE			TOTALCULTURE		
				N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Blé* sur maïs	10 ha	non	65 q	160	60	80	1.600	600	800
Blé* sur blé	5 ha	non	60 q	150	80	80	750	400	400
Maïs	10 ha	oui	80 q	120	50	100	1.200	500	1.000
Betterave	5 ha	oui	400 q	120	80	180	600	400	900
Moyenne/ha				138	63	103			
Total	30 ha						4.150	1.900	3.100

\* paille exportée

**Tableau 2 - Approvisionnements en engrais : exemple**

	CULTURE	SURFACE	TYPE D'ENGRAIS et dosage	DOSE/HA	TOTAL ENGRAIS	DÉPENSE	COMMANDE (FOURNISSEUR-DATE)
ENGRAIS AUTOMNE	Blé		Binaire PK		-		
	Escourgeon				-		
	Betterave				-		
ENGRAIS PRINTEMPS	Blé		Ammonitrate Ternaire NPK ou NPK+S		-		
	Escourgeon				-		
	Betterave				-		
	Colza				-		
	Maïs		Ternaire NPK				
<b>TOTAL EXPLOITATION</b>					PK ... t		
					Ammo ... t		
					NPK ... t		
					soit XN Y P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Z K <sub>2</sub> O		

# Fertilisation Environnement - Economie

## 1 - FERTILISATION ET ENVIRONNEMENT

La protection de l'environnement est une préoccupation qui est apparue dans les pays développés au cours des dernières décennies. En février 1990, les agriculteurs français ont été désignés comme les principaux responsables de la pollution des eaux par les nitrates. Depuis cette date, «la France tremble devant la pollution par les nitrates, peur en grande partie issue de l'ignorance, de la désinformation, du goût du sensationnel, peur qui n'est pas pour déplaire à certains acteurs économiques» (Claude Guillemin, rapport à l'Académie des Sciences sur la pollution des nappes d'eau souterraine en France, nov. 1991, repris dans l'édition du BRGM, juin 1992).

### 1 LA REALITE

LES TROIS «ELEMENTS MAJEURS» (N, P, K) ET LES TROIS «COMPOSANTES PRINCIPALES» DE L'ENVIRONNEMENT (AIR, SOL, EAU).

#### ● L'AIR.

Les nitrates dans les sols et dans certaines conditions d'anoxie sont en partie réduits en  $N_2$  et en protoxyde d'azote  $N_2O$  (environ 1 part de  $N_2O$  pour 9 de  $N_2$ ) et émis dans l'atmosphère. C'est le phénomène naturel de dénitrification.

Le rejet d'azote gazeux ( $N_2$ ) n'a aucune conséquence défavorable sur l'atmosphère, celle-ci étant composée **naturellement** de 80% d'azote. En revanche, le protoxyde d'azote, qui peut aussi provenir de l'azote des engrais (1 à 2% seraient convertis en  $N_2O$ ), est considéré comme un gaz à effet de serre. Selon certaines estimations, sa contribution à l'effet de serre serait de l'ordre de 5 à 6%, à comparer à celle du gaz carbonique  $CO_2$  (environ 55%), du méthane  $CH_4$  (15%), des chlorofluorocarbones CFC (24%).

L'agriculture contribuerait **globalement** pour 14% à l'effet de serre par rapport aux sources d'origine anthropique, c'est-à-dire dues aux activités de l'homme («agriculture et effet de serre» - Ministère de l'Agriculture, 1990).

Dans les régions à très forte concentration d'élevage, les émissions d'ammoniac  $NH_3$  à partir des déjections animales peuvent contribuer pour partie au phénomène des pluies acides. ( $NH_4^+ \rightarrow NO_3^-$ ).

**A l'opposé**, l'agriculture concourt à limiter la concentration en  $CO_2$  dans l'atmosphère :

- de façon directe par l'activité photosynthétique de la biomasse lorsqu'il y a augmentation du stock de matière organique,
- de façon indirecte par utilisation de cette biomasse à des fins énergétiques en limitant la combustion des énergies fossiles.

En permettant un accroissement de la production végétale, tout en diminuant les surfaces cultivées qui peuvent être transformées pour partie en forêts (dont les surfaces sont passées en France de 9,3 millions en 1862 à 11,3 en 1950 et à 14,9 millions d'hectares en 1993, soit une augmentation de 32% en 43 ans), l'utilisation des engrais, azotés notamment, participe aussi pour partie à l'action épuratrice de l'air par l'agriculture.

#### ● LE SOL.

La fumure minérale permet d'augmenter la production végétale, et, par voie de conséquence, les restitutions organiques (pailles, débris végétaux, masse racinaire, déjections animales, etc.). Les engrais minéraux sont donc générateurs d'humus : «On est loin des affirmations suivant lesquelles l'engrais minéral brûlerait l'humus et réduirait le sol à l'état de squelette... C'est en fait exactement l'inverse qui se produit et les preuves de ce fait abondent» comme l'écrivait André GROS dans la 7ème édition du «Guide Pratique de la Fertilisation» - La Maison Rustique, p.118.

Les diminutions du **taux** de matière organique dans certains sols de grande culture ne sont pas dues à l'utilisation des engrais, mais plutôt à certaines techniques culturales (labours plus profonds) et à des systèmes de culture à productions végétales dominantes où les matières organiques humifiables sont exportées. Mais, en quantité par hectare, la masse de matière organique du sol est généralement plus élevée aujourd'hui qu'il y a cinquante ans, malgré ce taux plus faible (volume de sol concerné plus important).

#### ● L'EAU.

**Les engrais potassiques** ne présentent, en général, aucun risque de pollution des eaux due au potassium.

**Les engrais phosphatés** : l'anion phosphate  $PO_4H_2^-$  est fixé par le complexe argilo-humique du sol encore plus énergiquement que le potassium. Des travaux récents (1989) effectués par l'INRA Quimper sur cases lysimétriques en monoculture de maïs, donnant des pertes moyennes de 0,150 kg  $P_2O_5$ /ha/an dans les eaux de drainage, confirment des résultats obtenus à l'INRA de Versailles.

Si une partie des «phosphates trouvés» dans les eaux superficielles peut provenir du phosphore fixé sur des particules de sol entraînées par l'érosion, et/ou du ruissellement superficiel de lisier ou de fumier, les engrais phosphatés minéraux ne sont pas affectés par le «lessivage» et ne peuvent donc pas, en général, entraîner des phénomènes de pollution des eaux souterraines. D'après G. Barroin («La Recherche», déc. 1991, cité dans le colloque Académie d'Agriculture/Agence de l'eau Loire-Bretagne, novembre 1992),

l'origine des phosphates rejetés dans le milieu aquatique en France se répartirait ainsi en pourcentage :

• eaux domestiques (lessives et détergents) :	50
• eaux industrielles :	28
• élevages :	17,5
• cultures :	4,5
	<hr/>
	100

**Les engrais azotés et les nitrates.** C'est actuellement le «problème» essentiel.

Les nitrates, très solubles dans l'eau, ne sont pas retenus par le pouvoir adsorbant du sol (cf. chapitre VI). Leur lessivage (ou lixiviation) est un phénomène naturel consistant en leur entraînement par l'eau infiltrée, qui est fonction de la quantité tombée (pluie ou irrigation) et du type de sol (capacité de rétention en eau).

Les préoccupations principales ne résident pas tant dans les taux exceptionnels observés çà et là après des accidents climatiques, que dans l'augmentation quasi générale, lente et progressive, du taux moyen de nitrates dans les eaux souterraines, et dans l'eutrophisation de certaines eaux superficielles, continentales ou littorales.

**L'eutrophisation des eaux superficielles** est due à un **enrichissement** en éléments nutritifs N, P, S, K, qui entraîne une croissance rapide de plantes aquatiques et d'algues. A leur mort, celles-ci empêchent l'eau de s'oxygéner normalement, d'où une modification de la flore et de la faune, pouvant aller jusqu'à la mortalité des poissons.

Pour certains scientifiques, les phosphates ont la responsabilité essentielle de l'eutrophisation des eaux superficielles; pour d'autres, ce sont les nitrates. En fait, selon les cas, soit l'azote, soit le phosphore, joue le rôle de facteur limitant pour le déclenchement du phénomène d'eutrophisation.

### **CONSEQUENCES DES NITRATES CONTENUS DANS L'EAU SUR LA SANTE**

La norme de 50 mg/litre de nitrates, à ne pas dépasser pour que l'eau soit considérée comme potable, a été déterminée à partir de la dose journalière admissible (DJA) pour l'homme, fixée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) à 3,65 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup> par kilo de poids corporel, soit, pour un homme de 70 kg, 250 mg/jour de nitrates. Sachant que, dans une alimentation de type occidental, la quantité moyenne journalière de nitrates apportée par les aliments est de l'ordre de 175 mg, la quantité «admissible» en provenance de l'eau est, par différence, de 75 mg. Pour une consommation «moyenne» journalière de 1,5 litre d'eau, sa teneur ne doit donc pas dépasser 50 mg/l. Les nitrates en provenance de l'eau ne représenteraient que 30% de la quantité totale ingérée, le reste venant surtout des légumes, mais aussi des viandes, fruits,

conserves. Les deux risques de l'excès de nitrates pour l'homme sont :

- **la méthémoglobinémie du nourrisson.** Suite à la réduction des nitrates en nitrites, l'hémoglobine est oxydée en méthémoglobine, qui, chez le nourrisson, peut revenir à l'état d'hémoglobine par absence de l'enzyme nécessaire (la diaphorase). Le sang ne s'oxygène plus, il y a asphyxie («maladie bleue»). Le même risque existe chez les femmes enceintes pour le bébé qu'elles portent.



*Prélèvement des échantillons d'eau pour l'analyse des nitrates (bassin d'Auradé/Gers).*

Ce point fait l'objet de débats. Selon le professeur J. L'HIRONDEL (Journée de la Société Française de Santé Publique, Rennes, mai 1993), et le docteur Jean VIAL (ancien président de la section des eaux au Conseil supérieur d'hygiène - Académie Agriculture, nov. 1992), «la méthémoglobinémie du nourrisson **n'est pas due aux nitrates, mais à des nitrites préformés dans le biberon en raison d'une prolifération bactérienne à partir de substances organiques**»\*. En outre, il faut constater, malgré l'augmentation des teneurs en nitrates des eaux, que les méthémoglobinémies d'origine hydrique ont pratiquement disparu en Europe occidentale» (Dr J. Vial, séminaire Eaux-Nitrates, Toulouse, 1989, et C. Guillemin, SFSP, Rennes, mai 1993).

● **Risque de cancer de l'appareil digestif.**

Les nitrates transformés en nitrites peuvent à leur tour être transformés en nitrosamines. Si le pouvoir cancérigène des nitrosamines est démontré chez les animaux en laboratoire, pour les humains, aucune enquête épidémiologique sérieuse n'a pu le mettre en évidence (INSERM, Lille, 1983 - SITE, Paris, 1986 - C. Guillemin, SFSP, Rennes, mai 1993, déjà cité).

**ORIGINES DES NITRATES**

Selon les estimations faites par le professeur HENIN de l'INRA, en 1980, les quantités d'azote minéral **mises en jeu** annuellement en France (cf. cycle de l'Azote chapitre VI) seraient de 9 à 10 millions de tonnes N (NO<sub>3</sub> = 4,429 N), qui se répartiraient ainsi :

<b>Phénomènes naturels :</b>	4,8 millions tN	
• fixation d'azote atmosphérique par les légumineuses	3,0 millions tN	52 %
• nitrification de la matière organique des sols	1,3 million tN	
• retombées atmosphériques	0,5 million tN	
<b>Déjections :</b>	2,0 millions tN	24 %
• animales	0,3 million tN	
• humaines		
<b>Engrais d'origine industrielle</b>	2,3 millions tN(*)	24 %

(\*) campagne 1992-93

«Un fait est frappant : la quantité d'engrais d'origine industrielle, **celle qui est considérée comme cause de pollution**, ne représente **que le quart du total** », (Prof. Hénin, «Paysans», Rennes, sept. 1989).

**Les quantités d'azote perdues** vers les eaux de surface et/ou les nappes phréatiques ne doivent pas être confondues avec les «quantités mises en oeuvre». Elles sont très variables, de même que leurs origines, selon les régions (et les années pour les fuites d'origine agricole).

Une première **approximation** attribue un tiers des «fuites de nitrates» à l'industrie et aux agglomérations urbaines, un tiers aux

déjections animales et un tiers aux sols cultivés.

Sur le bassin Loire-Bretagne (environ 1/3 de la SAU française), l'agence de l'eau estimait en novembre 1988 le flux de pollution azotée à 42% d'origine agricole, 49% d'origine domestique et 9% d'origine industrielle, en précisant que les pertes agricoles à l'hectare étaient très variables, de quelques kilos à 40 - 50 kg N/ha.

Selon l'agence de l'eau Seine-Normandie (Journée SFSP, Rennes, mai 1993, déjà citée), les «fuites» annuelles sous les sols seraient de l'ordre de 350.000 tonnes N par an, soit 16 à 22 kg/hectare. La même quantité serait émise par les élevages, dont 250.000 t vers les eaux de surface et 100.000 t vers les eaux souterraines.

Les fuites sous sols cultivés seraient dues pour :

- 50 % aux sols restant nus pendant l'hiver,
- 30 à 35% à une mauvaise adaptation des cultures aux types de sol (retournement de prairies permanentes pour faire des cultures annuelles, par exemple) et à une mauvaise gestion des résidus de culture,
- 15 à 20 % à une mauvaise gestion de la fertilisation azotée (AESN, mai 1993, précitée).

Ainsi, sur les 350.000 t, la «mauvaise fertilisation» correspondrait à un surplus de 53 à 70.000 tN, soit **2,5 à 3,3 %** de la quantité d'azote apportée par les engrais de synthèse.

Ces pourcentages d'azote en provenance des engrais sont confirmés par les essais avec azote «marqué» 15 N sur cases lysimétriques (INRA Châlons-sur-Marne et Versailles): «au total, on constate que, en année «normale», l'azote minéral retrouvé dans les eaux de drainage **ne contient souvent pas plus de 5% d'azote provenant des engrais**» (Etat de l'environnement - Secrétariat d'Etat à l'environnement, 1988).

«Grandeur nature», toutes ces conclusions sont confirmées par les résultats obtenus depuis 1980 sur le bassin versant d'Auradé (Sud-ouest toulousain) par Grande-Paroisse SA, avec le concours de l'agence de l'eau Adour-Garonne et du ministère de l'Environnement. Quatre idées-forces se dégagent de ces travaux :

- tous les écosystèmes engendrent des pertes de nitrates dans les eaux,
- l'importance des pertes en nitrates est liée à l'intensification : de 3 mg/l de NO<sub>3</sub> sous bassin versant forestier à 71mg/l sous bassin céréalier intensif,
- les pertes en nitrates sont essentiellement dues aux sols nus (en hiver),
- l'importance des pertes n'est pas liée directement aux apports récents d'engrais.

**LES NITRATES DANS LES EAUX : UN PROBLEME GLOBAL**

Toutes les activités humaines, urbaines, industrielles et agricoles contribuent donc à la pollution des eaux par les nitrates et les engrais chimiques ne peuvent être désignés comme seuls responsables.

\* Les travaux du Professeur Jean L'hirondel, qui fut interne des Hôpitaux de Paris et, de 1962 à 1982, professeur de clinique médicale infantile à Caen, ont été rassemblés par son fils Jean-Louis L'hirondel, lui-même docteur, et publiés en 1996 dans un livre intitulé "les nitrates et l'homme - Le mythe de leur toxicité". En conclusion, le docteur J.-L. L'hirondel écrit : "Si les biberons sont gardés à l'abri des pollutions microbiennes, les nitrates de l'alimentation, les nitrates des légumes, les nitrates des eaux de consommations sont sans danger pour l'homme".

---

Pour lutter contre la pollution d'origine agricole, il s'agit de prendre le problème dans son ensemble, comme l'indique l'Agence de l'eau Seine-Normandie dans une brochure de janvier 1994 «Sauvegarder le monde rural, c'est sauver l'eau», en préconisant :

- un aménagement rationnel,
- une gestion des sols,
- des pratiques d'élevage efficaces,
- une production végétale performante».

## 2 LE «CODE DES BONNES PRATIQUES AGRICOLES»

Le groupe de travail «Pratiques agricoles» du «Comité d'orientation pour la réduction de la pollution des eaux par les nitrates, les phosphates et les produits phytosanitaires provenant des activités agricoles (CORPEN)» a publié, en juin 1993, la 2ème édition de sa brochure «Amélioration des **pratiques agricoles** pour réduire les pertes de nitrates vers les eaux» ; ce travail faisait suite aux «propositions du CORPEN pour le Code de bonne pratique agricole» (avril 1993), élaboré en application de la directive européenne du 12 décembre 1991 (cf. ci-après, paragraphe 4).

### ● Le CORPEN identifie d'abord les risques de «fuites» des nitrates liés :

- **au sol** : profond, superficiel et/ou très filtrant, à réserve utile en eau élevée ou faible,
- **au climat** : pluviométrie hivernale, températures (hivernale et printanière),
- **aux successions culturales** : durée de l'interculture, bilan azote post-cultural, nature et devenir des résidus, apport de déjections en automne.

Il est souhaitable de revenir à une rotation de cultures à enracinements différents et à besoins inégaux en azote. Dans la mesure du possible, les cultures d'automne - céréales d'hiver, colza d'automne - seront préférées aux cultures de printemps pour éviter un sol nu pendant les saisons pluvieuses, automne et hiver. On choisira avec soin la culture succédant au retournement d'une prairie ou d'une légumineuse.

● **Le raisonnement de la fertilisation azotée** est fondé sur la notion de bilan (cf. chapitre VI, paragraphe 5, et chapitre XII, paragraphe 3). Il doit être fait chaque année pour chaque culture, et si possible chaque parcelle, en le corrigeant le cas échéant en cours de végétation.

Lors de l'utilisation des engrais, il faut, en plus :

- épandre l'engrais azoté avec précision et régularité (cf. chapitre XI),
- fractionner les apports d'azote en fonction des besoins de la plante,

- éviter les épandages d'azote en automne et en hiver, sauf si la culture en place est capable de les utiliser,
- éviter d'épandre l'azote sur sols fortement gelés ou enneigés.

Il faut également :

- bien raisonner la fertilisation azotée des sols drainés, plus aptes au lessivage,
- éviter de vouloir rattraper des erreurs de conduite culturale par des apports inconsidérés d'azote.

● **La fertilisation azotée n'est pas seule en cause ; de mauvaises pratiques agricoles peuvent augmenter le «risque nitrates»**. Il faudra donc prendre en compte dans le raisonnement :

- **les techniques de travail du sol** : il s'agit d'éviter les sur-minéralisations par travail simplifié ou enfouissement des pailles, et de favoriser une bonne implantation des cultures, afin de permettre une meilleure colonisation du sol par des systèmes racinaires bien développés et à plusieurs niveaux. L'amélioration ou, en tout cas, la non dégradation de la structure du sol facilite l'enracinement, ce qui suppose de n'intervenir qu'en bonnes conditions (sols portants, ressuyés) et avec un matériel adapté à la nature du sol.
- **les problèmes de l'interculture**: les résidus de récolte devront être gérés de façon à optimiser leur minéralisation sans augmenter le risque de lessivage. Des cultures intermédiaires pièges à nitrates seront implantées quand les conditions économiques et climatiques le permettront et en cas de bilan azote post-cultural nettement excédentaire.
- **l'irrigation** : bien conduite, elle permet d'obtenir une augmentation du prélèvement de nitrates par les cultures ; mais mal raisonnée ou contrôlée, elle risque d'augmenter le lessivage.

● **La gestion des effluents d'élevage** a une importance aussi grande - et même plus en région d'élevage intensif - que le raisonnement de la fertilisation azotée minérale. Elle comporte deux aspects :

- la collecte et le stockage, avec le souci d'éviter des pertes ponctuelles et d'améliorer la qualité des produits,
- la valorisation économique de ces effluents d'élevage. Des méthodes d'analyses rapides existent qui permettent d'en connaître la composition, notamment pour l'azote, et aussi de calculer les quantités d'éléments fertilisants épandues.

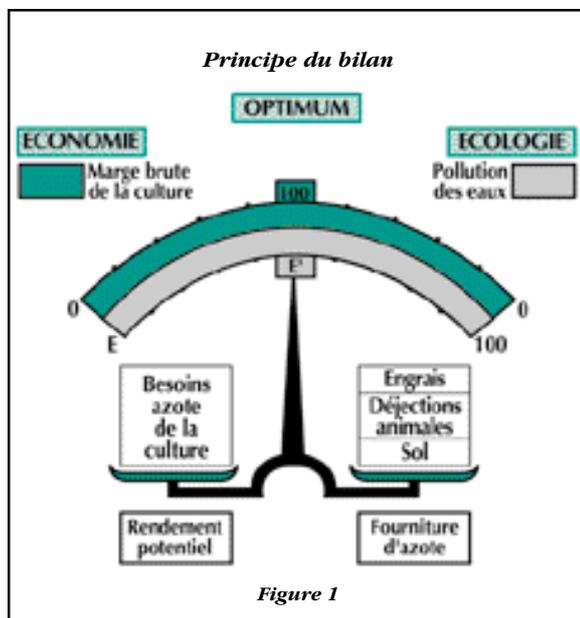
Le CORPEN a défini les conditions d'emploi, pour éviter des apports excessifs d'effluents d'élevage, mal contrôlés, difficilement utilisables par les plantes, et diminuer ainsi les risques de ruissellement et d'entraînement vers les rivières.

### 3 LA FERTILISATION RAISONNEE PERMET DE CONCILIER AGRICULTURE PERFORMANTE ET QUALITE DES EAUX

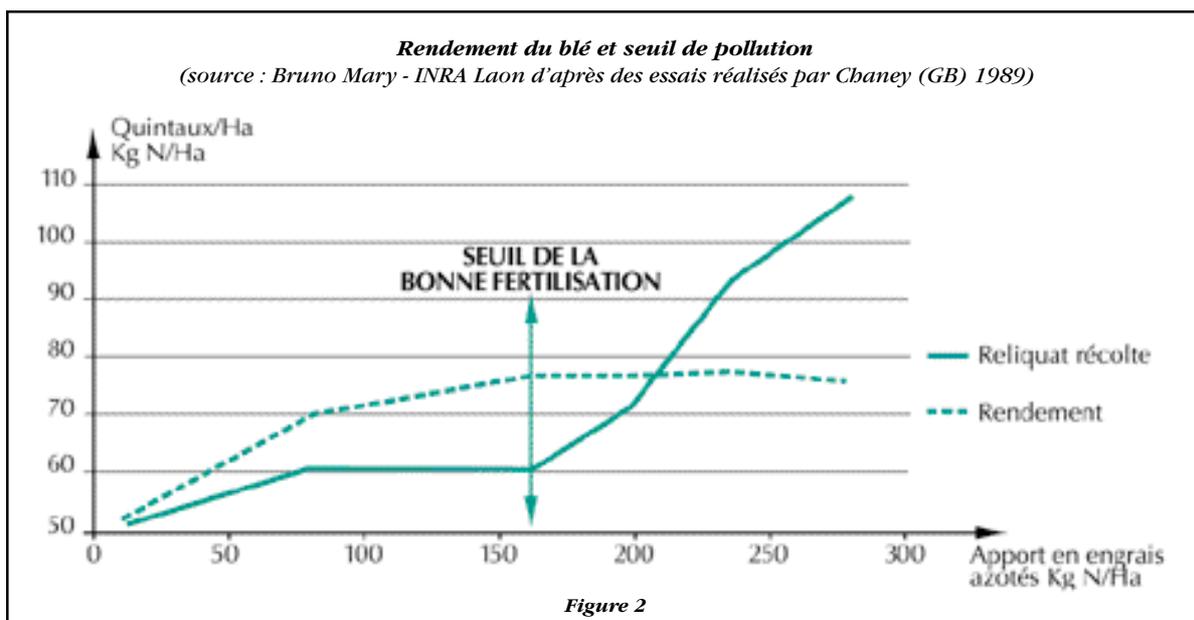
Il est bien établi qu'un engrais azoté «bien» employé («la bonne dose au bon moment») n'est pas potentiellement polluant.

**Le principe du bilan** (cf. chapitre VI, paragraphe 5) peut être représenté par une balance (figure 1) avec, dans le plateau de gauche, les besoins en azote de la culture et, dans celui de droite, les différentes fournitures (sol, déjections animales, engrais). Si ces fournitures sont faibles et inférieures aux besoins de la culture, le rendement, donc la marge brute de celle-ci (cadran du haut) est faible (aiguille vers la gauche). Au fur et à mesure que les fournitures d'azote augmentent, il en est de même pour le rendement et la marge brute; l'aiguille se déplace de la gauche vers la droite, et passe par un **optimum économique** correspondant à l'**équilibre** entre besoins en azote nécessités par le rendement potentiel et **fournitures**; à ce moment, on a la **marge brute optimale** (100). Puis, si les fournitures sont supérieures à ce besoin (rendement potentiel), l'aiguille va pencher vers la droite, et la marge brute va diminuer: au mieux le rendement n'augmente pas et pourra même diminuer (verse des céréales), tandis que les charges d'engrais augmentent; on gaspille en pure perte.

● Parallèlement, **de très nombreux essais** (station d'Askov au Danemark, Chaney en Grande-Bretagne, B. Mary INRA Laon, J.C. Simon INRA Quimper, Schenck INRA Colmar, F. Limaux



CRA Lorraine, R. Koller CRA Alsace, AGPM, Université de Gembloux Belgique, etc.) **prouvent que les reliquats d'azote à la récolte** (azote «potentiellement polluant») **ne sont pas significativement différents à la dose optimale d'emploi d'azote** (inférieure à celle qui procure le rendement maximum, quantité dépendant des prix respectifs de l'azote et de l'unité de produit récolté) **par rapport à ceux enregistrés sur les parcelles témoins sans azote** (figure 2).



Tant qu'on est sur la partie gauche du cadran de la figure 1, on ne modifie pas la qualité des eaux de surfaces.

Par contre, si les fournitures d'azote sont supérieures aux besoins nécessaires à l'obtention du rendement potentiel, les reliquats à la récolte s'accroissent fortement, ainsi que l'attestent les courbes expérimentales de la figure 2.

**A la dose optimale d'emploi d'azote, on a en même temps la meilleure marge brute (économie) et le reliquat d'azote le plus faible ou presque (écologie).**

● **D'autres méthodes** permettent de «se situer» en matière de fertilisation azotée :

- le bilan Azote à l'exploitation (bilan CORPEN),
- la méthode BASCULE (Balance Azotée spécialisée des Systèmes de Culture de l'Exploitation) de l'INRA-SAD Mirecourt, qui affine à la parcelle le bilan CORPEN,
- le programme Envir'Action du BTPL,
- la méthode DEXEL - diagnostic global d'environnement de l'exploitation, de l'Institut de l'élevage.

#### 4 ASPECTS REGLEMENTAIRES

Un certain nombre de textes, législatifs et réglementaires, relatifs à l'eau, ont été adoptés tant au niveau européen que français. Les principaux d'entre eux concernant la fertilisation sont :

##### Au niveau européen

- La directive du 15 juillet 1980 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine (norme de 50 mg/l de nitrates) qui, fin 1996, était en cours de révision.
- La directive du 12 décembre 1991 sur la protection des eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole («Directive Nitrates»).

##### Au niveau français

- Le décret du 3 janvier 1989 reprenant la directive CEE du 15/7/1980 sur la qualité des eaux destinées à la consommation humaine.
- La loi sur l'eau du 3 janvier 1992 abrogeant la plupart des articles de la précédente loi de 1964.
- Le décret du 27 août 1993 (JO du 3 septembre 1993) relatif à la protection des eaux contre la pollution par les nitrates d'origine agricole. Il transpose dans le droit français la première phase de la «Directive Nitrates» sur la délimitation des zones vulnérables et le code des bonnes pratiques agricoles. Il a été pris en application des articles 8 et 9 de la loi sur l'eau.

- L'arrêté du 22 novembre 1993 (JO du 5 janvier 1994) relatif au code des bonnes pratiques agricoles. Il officialise le code des bonnes pratiques agricoles du CORPEN (cf. paragraphe 2 du présent chapitre).
- Le décret et l'arrêté du 4 mars 1996 (JO du 5 mars et du 3 avril 1996) qui transposent dans le droit français la deuxième phase de la «Directive Nitrates», relative aux programmes d'action à mettre en oeuvre, dans les zones vulnérables.

La délimitation des zones vulnérables (zones dont les eaux ont atteint ou dépassé, ou «sont susceptibles d'atteindre» le seuil de 50 mg N03/l) devait être effectuée avant le 18 décembre 1993 selon la «Directive Nitrates» ; fin 1996, elle n'était pas encore achevée en France.

Une opération nationale de conseil en fertilisation dite «opération Ferti-mieux» a été lancée par le Ministère de l'Agriculture et les organisations agricoles auxquels se sont joints tous les partenaires de la filière, dont l'industrie des engrais. Elle consiste à labelliser des opérations de fertilisation azotée raisonnée dans des zones vulnérables.



*Les contraintes d'environnement doivent être prises en compte dans l'aménagement rural.*

## 2 - FERTILISATION ET ECONOMIE (Qualité des produits)

### I FERTILISATION ET PRODUCTION DE BIENS ALIMENTAIRES

Le premier but de l'agriculture est de fournir au consommateur des produits de qualité, au meilleur prix et en quantités suffisantes. La fertilisation joue un rôle essentiel dans la production des biens alimentaires : l'évolution comparée de la consommation d'engrais et de la production de céréales en France entre 1960 et 1995 est très significative à ce point de vue :

tions dues aux conditions de milieu, permet d'assurer la sécurité de production, et donc de l'approvisionnement du consommateur.

La productivité permise par la fertilisation abaisse les coûts de production, et donc les prix de vente (en francs constants) au consommateur : le coût du « panier de la ménagère » a beaucoup diminué en raison de l'accroissement de la productivité agricole. Si l'agriculteur ne produisait que 20 quintaux de blé à l'hectare et 2000 litres de lait par vache, comme en 1950, la ménagère dépenserait encore 50 % de

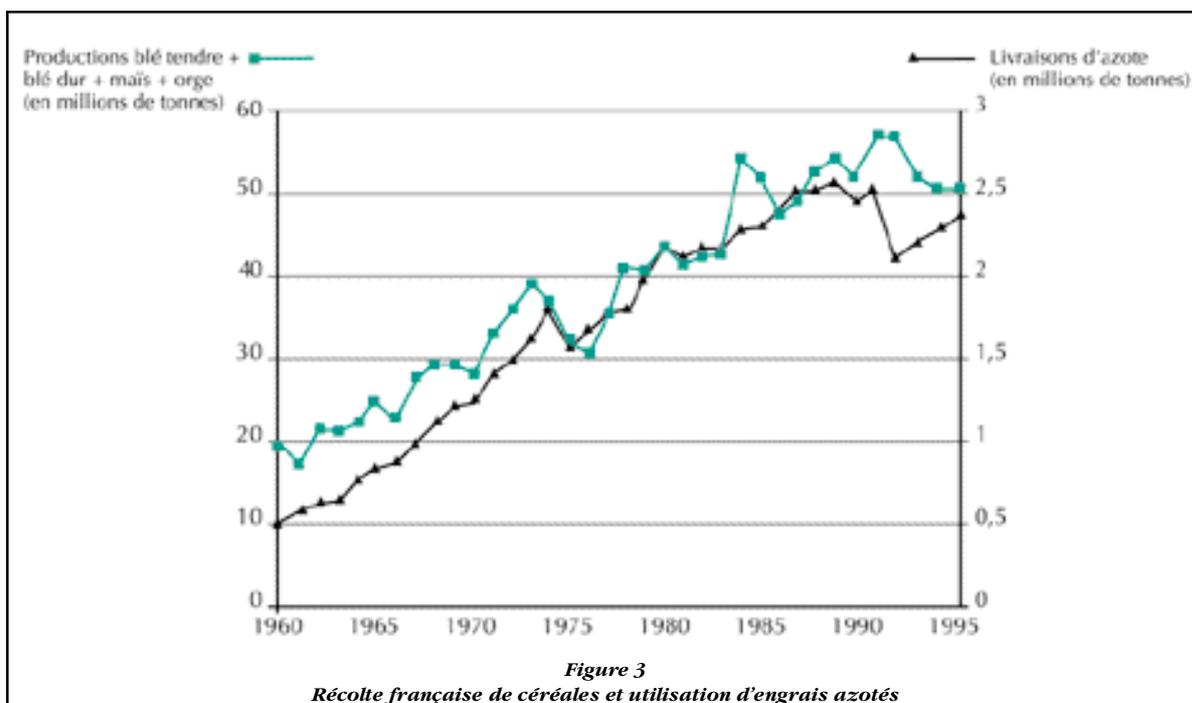


Figure 3  
Récolte française de céréales et utilisation d'engrais azotés

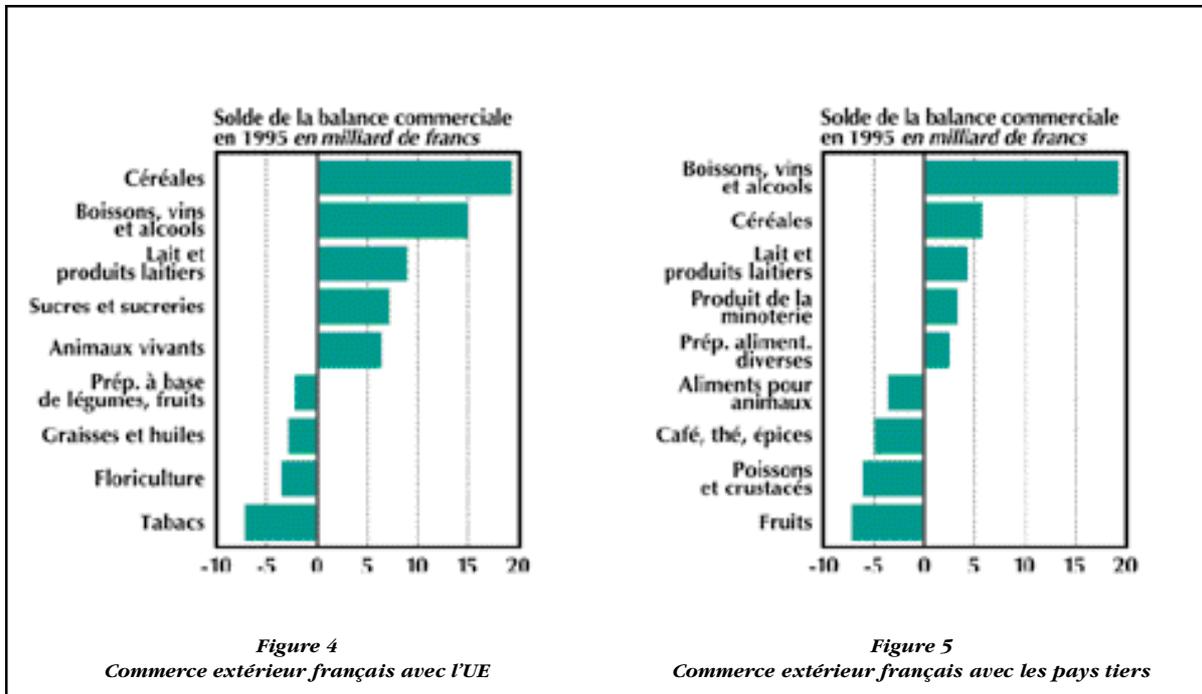
Une telle augmentation de la production a permis de mettre les pays pratiquant une agriculture moderne à l'abri des disettes et des famines qui ravageaient les populations au cours des siècles précédents. Le plein effet de la fertilisation n'a été rendu possible que par la combinaison de tous les moyens de production : espèces et variétés à haut potentiel génétique, cultivées sur un sol bien préparé, et protégées efficacement contre les parasites et les maladies.

Le bon usage de la fertilisation, en réduisant les écarts de rendements d'une année sur l'autre, en tamponnant les varia-

son budget pour nourrir sa famille, et non pas les 20 % qu'elle y consacre aujourd'hui.

L'augmentation de la production agricole depuis 1950 a permis à la France, qui était dépendante de l'extérieur pour son alimentation, de devenir **le deuxième exportateur mondial de produits agricoles et alimentaires** après les Etats-Unis.

Le secteur agro-alimentaire contribue largement - environ 50 milliards de F d'excédents bruts en moyenne annuelle (57 en 1993, 46 en 1994, 49 en 1995) - à l'équilibre de la balance commerciale française.



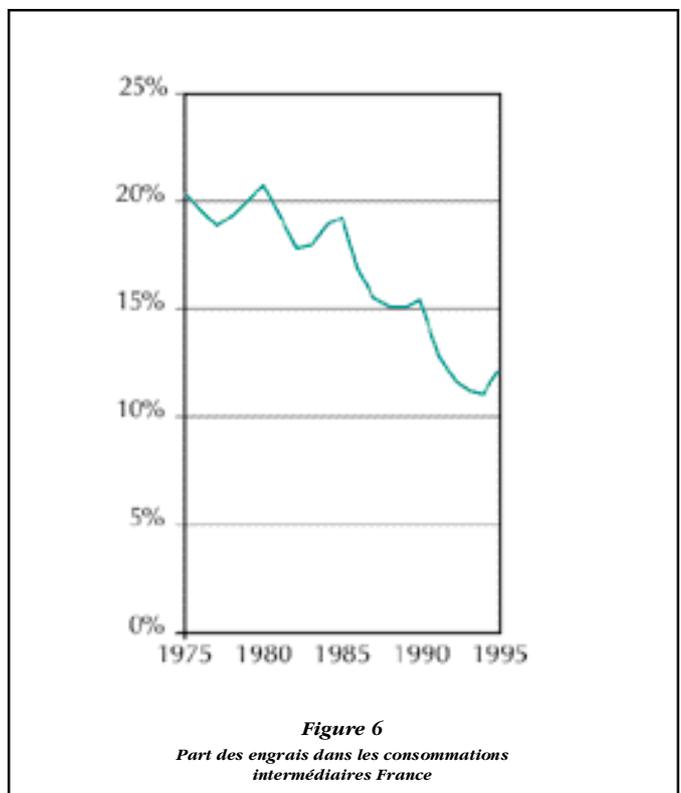
Source : "L'agriculture, la forêt et les industries agro-alimentaires/1996" - SCEES/Ministère de l'agriculture

## 2 EVOLUTION RECENTE DE LA PART DES ENGRAIS DANS LA PRODUCTION AGRICOLE

Comme dans les autres branches de production, l'agriculteur est tributaire des conditions économiques. Pour retirer un revenu décent de son travail et de ses investissements, il doit rechercher la meilleure marge brute à l'unité de produit ou de surface.

Au cours de ces dernières années, la baisse des prix agricoles, la réforme de la Politique agricole commune (PAC), les accords du GATT ont et auront de profondes répercussions économiques, sociales et financières sur les entreprises agricoles et leurs partenaires «d'amont» et «d'aval».

Si, depuis 1970, la part des consommations intermédiaires dans la production finale agricole n'a cessé de croître, passant de 30 à 45 % - augmentation due surtout à l'accroissement de l'utilisation des produits phytosanitaires - la part des engrais a presque été divisée par 2 dans le même temps, passant de 20 à 12 % . Ramenée à la valeur de la production agricole, celle des engrais est de 5,3 % dans la production agricole finale et de 9,6 % dans la production végétale.



### Evolution de la consommation d'engrais en France

Source : INSEE et SNIE

	CONSUMMATION D'ENGRAIS (en milliers t. éléments fertilisants)				ACHATS DES EXPLOITATIONS		VOLUME	PRIX CONSTANTS
	TOTAL	AZOTÉS	PHOSPHORIQUES	POTASSE	MILLIONS F	% DES CI	1980 = 100	1980 = 100
«1960»	2234,0	554,4	946,2	733,4	1412,7	21,6	30,0	106,1
«1970»	4604,5	1378,6	1825,5	1390,5	3407,3	19,9	63,2	82,3
«1980»	5761,0	2169,7	1860,0	1731,3	15100,0	19,5	99,8	96,1
«1990»	5782,0	2563,0	1371,0	1848,0	19648,3	14,6	99,3	68,6
1992	4849,0	2328,0	1082,0	1439,0	15662,0	11,9	83,4	82,0
1993	4774,0	2288,0	1063,0	1423,0	14606,0	11,3	81,7	57,9
1994	4662,0	2268,0	1052,0	1342,0	14646,0	11,1	80,8	57,6
1995	5001,9	2440,2	1076,1	1485,6	16752,0	12,3	86,8	60,5

Ceci relativise l'intérêt économique d'une recherche systématique - et parfois «aveugle» - de la réduction des doses d'engrais... par ailleurs puissant levier de la production. Là comme ailleurs, il y a lieu de procéder à un raisonnement technique et économique.

Cette baisse de la valeur monétaire des engrais utilisés en France est due à deux facteurs :

- chute des prix en francs constants de 40% de 1980 à 1995,
- chute des quantités utilisées : 13% pour la même période et pour l'ensemble des 3 éléments N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O.

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et K<sub>2</sub>O ont été les plus affectés par les réductions d'utilisation ; ainsi en 1995, on retrouve le début des années soixante pour P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et des années 1970 pour K<sub>2</sub>O.

Or, si une partie de la diminution du volume des engrais utilisés doit être imputée à la diminution des surfaces fertilisées, due aux **jachères** (1,75 million hectares en 1994-95) une autre partie est due à la réduction des doses utilisées par hectare.

On est arrivé ainsi, dans certains départements n'ayant pas d'élevage important, à des doses P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et K<sub>2</sub>O inférieures à 30-40 unités/ha, ne permettant pas d'atteindre le simple niveau des restitutions : on vit sur le stock accumulé pendant les «Trente Glorieuses», on **décapitalise** le sol. Le potentiel de production du sol est ainsi peu à peu amputé, et les essais de longue durée montrent que parfois, il faut des années pour revenir au niveau initial.

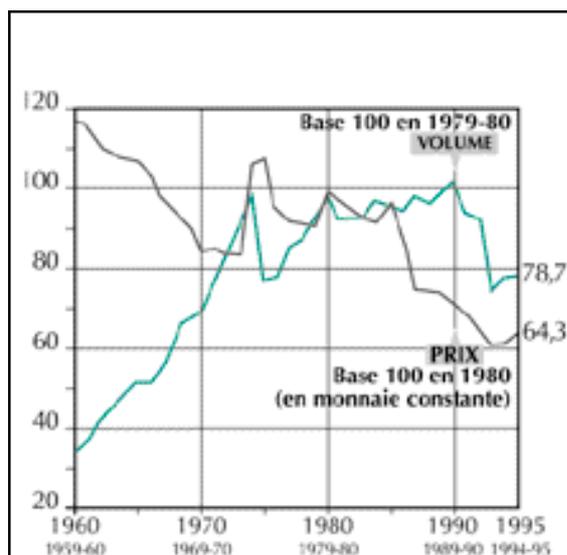


Figure 7  
Evolution des livraisons et des prix des engrais

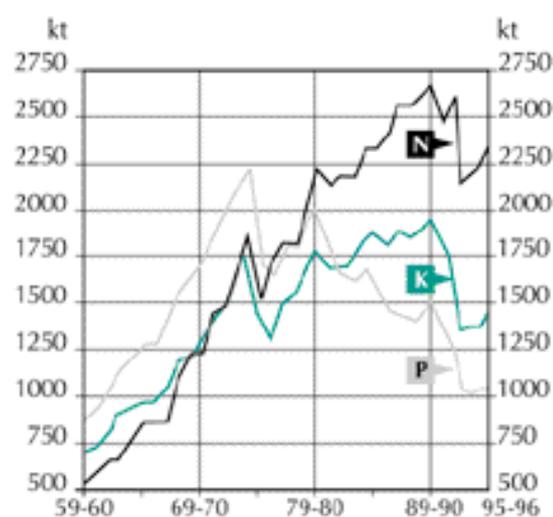


Figure 8  
Evolution des livraisons par éléments fertilisants

---

### 3 QUEL AVENIR ?

Au début du XXI<sup>e</sup> siècle, c'est-à-dire demain, il y aura près de 10 milliards d'êtres humains à nourrir. La production agricole mondiale devra donc être accrue pour satisfaire les besoins d'une population en augmentation ; plus que jamais, il sera indispensable d'utiliser rationnellement les ressources en eau, les engrais et les moyens de protection des cultures.

Il ne faut pas trop compter sur la mise en culture de nouvelles terres : celles-ci sont souvent peu profondes, fragiles et situées sous des climats inappropriés (trop secs, trop froids ou trop chauds), et de plus, il faut du temps pour développer le potentiel productif d'un sol. C'est donc sur les 5 % des surfaces agricoles de la planète où sont actuellement pratiqués l'agriculture et l'élevage intensifs, donnant 90 % des productions agricoles totales, qu'il faudra compter.

De nombreuses autorités compétentes s'accordent à dire que la voie inéluctable de l'avenir reste l'intensification raisonnée et la compétitivité.

M. Jean PUECH, ancien ministre de l'Agriculture, écrivait (BIMA du 12 février 1994) :

«L'avenir de l'agriculture se joue à deux niveaux :

- sa compétitivité internationale : elle est déjà incontestable, il faut certes la maintenir, mais aussi la renforcer

pour en faire, secteur par secteur, l'agriculture la plus performante d'Europe...

- sa place dans l'aménagement de notre territoire, dans la recherche de ses équilibres économique, social, culturel, dans la gestion de l'espace.»

### 4 FERTILISATION ET QUALITE DES PRODUITS

Une fertilisation optimale, avec un bon équilibre entre les éléments nutritifs, est indispensable pour assurer à la fois de hauts rendements et une bonne qualité.

La qualité d'un produit peut s'apprécier selon des critères subjectifs et objectifs.

#### Les critères subjectifs :

couleurs, consistance, goût, odeur,...

Ils sont souvent perçus de façons très diverses.

Si les consommateurs ont l'impression d'une baisse des qualités gustatives des produits, cela est dû beaucoup plus aux inévitables contraintes actuelles de transport, de stockage et de transformation qu'aux variétés nouvelles ou à l'intensification de la fertilisation.



### **Les critères objectifs :**

concernent la qualité technologique, la valeur nutritive des aliments et des végétaux.

● **La qualité technologique**, qui intéresse les industries transformatrices, est l'objet de tests ou d'analyses normalisées.

L'azote est principalement concerné. Des fumures azotées excessives ou trop tardives ont des effets préjudiciables pour l'extraction du sucre de la betterave ou la fermentation du malt d'orge. Par contre, les apports tardifs d'azote, en accroissant le taux de protéines des grains, contribuent à diminuer le mitadinage des blés durs et à améliorer la valeur boulangère des blés tendres avec, comme conséquence, un meilleur classement sur les marchés d'exportation.

La fumure phosphatée et potassique augmente le poids spécifique et le poids de mille grains des céréales.

La potasse a notamment un effet favorable sur la teneur en sucre de la betterave, sur la qualité et la conservation des fruits.

On a voulu parfois attribuer à la fumure minérale une baisse de qualité de certains produits. En réalité, de nombreuses études ont montré que le contrôle analytique ne permettait pas de faire une distinction entre deux aliments provenant de la même espèce végétale cultivée soit avec une fumure organique, soit avec des engrais minéraux. Il n'a pas été trouvé de différence sensible dans leur composition, alors qu'au contraire le climat de l'année et les caractéristiques physico-chimiques du sol ont une influence prépondérante.

● **La valeur nutritive des aliments** consommés par l'homme est souvent modifiée dans un sens positif par les apports de fumure organique ou minérale. Ajustés aux besoins physiologiques de la plante, ils corrigent les imperfections du sol par apport du ou des éléments présents en quantité insuffisante.

Les exceptions signalées dans la littérature sont imputables à des fumures excessives ou totalement déséquilibrées. C'est ainsi que l'on a établi que l'excès d'azote peut provoquer dans quelques plantes (carottes, épinards) une accumulation de nitrates. Mais on oublie de préciser que cette trop forte teneur en nitrates peut aussi bien être due à la mise en valeur d'un sol riche en humus qu'à l'emploi de fumures minérales ou organiques trop élevées.

● **La qualité nutritive des végétaux** utilisés en alimentation animale est souvent augmentée par la fertilisation. Il en découle des conséquences favorables sur la productivité et l'état sanitaire des animaux.

La fertilisation azotée des prairies ou les épandages tardifs



*Une fertilisation équilibrée permet de récolter des produits de qualité.*

d'azote sur céréales ont le plus souvent pour effet bénéfique d'accroître la teneur en protéines de l'herbe et des grains, en même temps que les rendements.

La qualité minérale du fourrage est liée à la richesse du sol et au mode d'apport des engrais.

Le fractionnement de la fumure phosphatée, partie en automne-hiver, partie au départ de la végétation en association avec le premier apport d'azote, permet d'accroître la teneur en P de l'herbe et du foin. Dans le cas des prairies naturelles, souvent mal fertilisées et fauchées tardivement, il est alors possible de dépasser le seuil de 2‰ de P dans la matière sèche, seuil au-dessous duquel le bétail est prédisposé à divers troubles nutritionnels.

Une fumure phosphatée convenable des prairies contribue à la lutte contre l'infertilité des vaches laitières, ainsi qu'à la régression de maladies osseuses et de l'entérite paratuberculeuse.

Dans certains cas, une fertilisation supplémentaire avec apport de magnésium, de sodium, de cuivre et de cobalt paraît recommandable.

---

● **La fertilisation raisonnée améliore la qualité des produits.**

Et pourtant, motivés par des préoccupations commerciales, ou inquiétés, sans raison sérieuse, par différents aspects du progrès dans les pays nantis, certains contestent les techniques de l'agriculture moderne et rêvent de revenir à l'agriculture de «grand papa».

Les engrais, notamment les engrais solubles, «empoisonneraient» le sol et les plantes et constitueraient un danger pour la santé humaine.

Il est facile de réfuter de tels arguments :

- La fertilisation minérale est le complément indispensable d'une fertilisation organique qui ne saurait à elle seule entretenir la fertilité de tout l'espace cultivé.
- Les engrais mettent à la disposition des plantes des sels nutritifs semblables à ceux que le sol leur fournit en quantité insuffisante. La minéralisation de la matière organique aboutit à des formes d'azote, de phosphore et de potassium identiques à celles qui sont présentes dans les engrais.
- Ils restituent au sol les éléments minéraux exportés par les récoltes et corrigent les carences que le recyclage

des amendements organiques produits sur place ne saurait faire disparaître.

- Une fertilisation minérale adaptée à la plante n'a aucune conséquence défavorable sur la qualité des produits.
- Enfin, comment les engrais pourraient-ils mettre en péril la santé de l'homme, alors que la longévité de la vie humaine n'a cessé d'augmenter, particulièrement dans les pays d'agriculture intensive ?

Des produits riches, nutritifs, équilibrés, bien mûris, sains, aptes à la transformation et à la conservation, telles sont les conditions essentielles du maintien des qualités organoleptiques.

L'obtention de telles qualités suppose une utilisation rationnelle des moyens de production de l'agriculture moderne : c'est bien ce qui a été fait depuis la fin de la seconde guerre mondiale. Cela a permis à la population de bénéficier d'une alimentation plus riche, plus diversifiée, plus équilibrée et de meilleure qualité.



*Le coût du «panier de la ménagère» a diminué grâce à la productivité agricole.*