

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE NANCY  
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE  
Service de Mise en Valeur des Sols

MICHELLON Roger

DOCUMENTS CONCERNANT

L'ENSEIGNEMENT DE LA FERTILISATION DES SOLS

par

F. JACQUIN

OPTION : MISE EN VALEUR DES SOLS

Une des vocations de l'Université de NANCY correspond à l'étude des Sciences de la Terre et il était tout à fait logique que la Science du Sol et ses applications pratiques s'insèrent dans ce complexe. D'autre part il nous a paru absolument indispensable de relier la recherche fondamentale et la recherche appliquée. Il faut reconnaître que nous nous trouvons dans une situation privilégiée bénéficiant d'une collaboration étroite entre le Centre de Pédologie-biologique du C.N.R.S. dirigé par Monsieur le Professeur DUCHAUFOR et de l'implantation à Nancy du Centre National de Recherches Forestières, et tout spécialement de ses sections Pédologie et Fertilisation.

ENSEIGNEMENT

Tout d'abord dans l'esprit de l'Universitaire, de l'Etudiant ou de l'Utilisateur, cette option de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique des Industries alimentaires, ne doit pas correspondre à une spécialisation mais à un complément de formation ; pour cette raison, son enseignement est étroitement lié à celui de la fin du deuxième semestre de seconde année.

- Pendant dix huit mois, le futur ingénieur aura reçu, d'une part un enseignement général pouvant être en partie commun à tous les ingénieurs de l'Institut National Polytechnique, et d'autre part un enseignement plus orienté vers les sciences biologiques. Un complément spécifique devra lui permettre d'acquérir le diplôme d'agronomie générale.

Cette formation de haut niveau sera donc déjà orientée, aussi nous pensons que pour l'option mise en valeur des sols, les futurs ingénieurs doivent acquérir des notions complémentaires de pédologie en liaison avec l'Université (Certificat de Maîtrise C<sup>4</sup>). En effet, au moment où l'écologie et l'environnement correspondent à des disciplines de plus en plus nécessaires, l'étude de l'évolution des sols s'impose pour deux raisons majeures.

a) Il s'agit du support de base à toute écologie moderne et étude de l'environnement, car dans la plupart des cycles biologiques naturels et perturbés par des facteurs extérieurs (intervention humaine - contamination - pollution) le sol restera l'un des maillons le plus important.

b) La pédologie au sens strict ou science de l'évolution des sols correspond par excellence à une formation polyvalente ; elle nécessite des connaissances aussi bien dans les sciences exactes (physique des sols, interprétation de calcul statistique), que dans de nombreux domaines de la biologie (botanique - géologie - chimie-biologie, etc...)

- Entre la deuxième et la troisième année les étudiants effectueront, obligatoirement, un stage de cartographie sur le terrain avec, comme rapport, une présentation de carte génétique des sols accompagnée d'une notice et d'un projet de mise en valeur concernant l'agronomie, la sylviculture et l'urbanisme.

- Au cours de leur troisième année les étudiants pourront opter pour deux formations différentes, ceci en fonction de leurs aptitudes, de leur vocation, ou tout simplement pour acquérir une formation qu'ils n'auront plus la possibilité d'obtenir au début de leur vie professionnelle.

a) Formation orientée vers les disciplines scientifiques avec initiation à la recherche. A Nancy existent, conjointement à l'E.N.S.A.I.A. le seul centre de recherche de pédologie-biologique du C.N.R.S. (Centre National de la Recherche Scientifique) et la principale antenne du C.N.R.F. (Centre National de la Recherche Forestière). La base de cet enseignement est essentiellement écologique, son programme correspond sensiblement à celui du D.E.A. de pédologie enseigné à Nancy . . . . .

et dont les grandes lignes sont publiées dans le Bulletin d'Ecologie Française. Les étudiants bénéficient donc de l'enseignement d'un des plus éminents spécialistes de la pédologie, M. le Professeur DUCHAUFOR, ensuite pendant 6 à 8 mois et parfois plus, ces élèves-ingénieurs participent personnellement, mais sous la direction d'un chercheur confirmé, à un travail de recherche fondamentale ou appliquée ; par la suite il leur sera donc facile de poursuivre vers la préparation du Doctorat.

b) Formation orientée vers les aspects techniques et économiques de la mise en valeur des sols. Là encore Nancy possède des ressources intellectuelles comparables à celles de la Capitale.

- Au point de vue technique l'enseignement sera essentiellement basée sur :

1) la maîtrise de l'eau dans le sol avec la collaboration du C.E.R.A.F.E.R et du Génie Rural : MM. CORDA, CROS

2) la fertilisation des sols grâce à un cycle de conférences effectuées par des spécialistes des services agronomiques des différentes firmes d'engrais et de l'Institut National de la Recherche Agronomique.

3) la mise en valeur agronomique et forestière, par les professeurs de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique et des Industries Alimentaires, de l'Ecole Nationale du Génie Rural et des Eaux et Forêts, notamment : MM. DUCHAUFOR, JACAMON, JACQUIN, VENET.

- Au point de vue économique, l'Institut pour la préparation à la gestion des entreprises ( I.P.A.E. ) de l'Université permet d'acquérir les connaissances nécessaires en ce domaine et un cycle de conférences, organisé par la coopération agricole apportera un appoint judicieux.

En conclusion, nous espérons ainsi que, joint à la valeur personnelle des candidats, nous formerons des ingénieurs capables de rendre service à l'agronomie et, dans un éventail plus large, susceptibles de résoudre les nombreux problèmes approchant, de près ou de loin, au domaine biologique.

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE  
DE NANCY

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'AGRONOMIE  
ET DES INDUSTRIES ALIMENTAIRES  
(E.N.S.A.I.A.)

30 bis, rue Sainte-Catherine - 54 - NANCY  
Tél. (28) 24.28.63

PROGRAMME des ENSEIGNEMENTS de " SCIENCE du SOL "

1ère ANNEE : 75 Heures

1. COURS d'AGROLOGIE : Monsieur JACQUIN

37 H 1/2

- 1)- ETUDE MORPHOLOGIQUE du MILIEU
  - Profil cultural - Profil pédologique
- 2)- ETUDE DES ELEMENTS PHYSIQUES
  - Texture,
  - Structure,
  - Stabilité structurale
- 3)- ETUDE des PROPRIETES CHIMIQUES
  - Complexe absorbant
  - pH - rH
- 4)- AMELIORATION des PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES
  - Bilan et amendements organiques,
  - Culture biologique,
  - Amendements calciques et magnésiens.
- 5)- RELATION ENTRE l'EAU, LE SOL et les PLANTES
  - Différents états de l'eau dans le sol
  - Mouvements de l'eau dans le sol
  - Amélioration du profil hydrique par drainage et irrigation
- 6)- RELATION entre les PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES et le TRAVAIL d'un SOL.
- 7)- LIAISON ENTRE AGROLOGIE et PEDOLOGIE
  - Description succincte et vocation culturale des différentes classes de sols.

PROGRAMME des ENSEIGNEMENTS de " SCIENCE du SOL " ( suite )  
-----

2. TRAVAUX PRATIQUES et TRAVAUX DIRIGES : MM. GUCKERT et SCHIAVON

---

42 H. = 14 X 3

- 1.) Présentation des profils pédologiques ( Montet)
- 2.) Etude des structures ( aspects macro et microscopiques)  
Caractérisation des humus
- 3.) Description du profil cultural ( Bouzule)
- 4.) Analyse granulométrique
- 5.) Dosage du calcaire actif et total
- 6.) Mesure de S et T
- 7.) Mesure du pH et détermination du besoin en chaux
- 8.) Description de sols au laboratoire
- 9.) Etats de l'eau dans le sol
- 10.) Stabilité structurale et perméabilité
- 11.) Travail du sol ( Bouzule)
- 12.) Présentation des cartes géologiques
- 13.) Présentation des cartes pédologiques
- 14.) Examen.

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE  
DE NANCY

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'AGRONOMIE  
ET DES INDUSTRIES ALIMENTAIRES  
(E.N.S.A.I.A.)

30 bis, rue Sainte-Catherine - 54 - NANCY

Tél. (28) 24.28.63

PROGRAMME des ENSEIGNEMENTS de " FERTILISATION "

2ème ANNEE : 60 heures

1. COURS de FERTILISATION : Monsieur JACQUIN

22 H 1'2 =

15 x 1 H 1/2

- 1)- Lois de la fertilité et expérimentation appliquée aux problèmes particuliers de fertilisation
- 2)- Etude théorique de la fertilisation azotée avec comme thème principal l'aspect biologique de la minéralisation
- 3)- Etude théorique de la fertilisation phosphatée avec comme thèmes principaux la migration des éléments minéraux à l'aide d'isotopes et la cinétique des équilibres chimiques du sol.
- 4)- Etude théorique de la fertilisation potassique avec comme thèmes principaux les liaisons avec le complexe absorbant et les phénomènes d'interaction.
- 5)- Etude théorique des éléments mineurs et des oligoéléments avec comme thèmes principaux les phénomènes de carence et toxicité.
- 6)- Aspects technologiques :
  - Visite commentée des stands du matériel de distribution au S.I.M.A.
- 7)- Aspects économiques :
  - Conférence-débat sur la législation et les systèmes de vente des engrais en France et dans le cadre du Marché Européen.
- 8)- Aspects pratiques :
  - Exposés des étudiants préparés à l'aide de documents sélectionnés sur des exemples concrets de fertilisation.
- 9)- Synthèse :
  - Rôle de l'Ingénieur-Agronome dans l'augmentation rationnelle de la fertilité des sols.

PROGRAMME des ENSEIGNEMENTS de " FERTILISATION " ( suite )

-----

2. TRAVAUX PRATIQUES et TRAVAUX DIRIGES : MM. GUCKERT et SCHIAVON

---

37 H. 1'2 = 12 X 3 + 1 H. 1'2

- 1)- Dosage du C Total et C N.
- 2)- Fractionnement de la matière organique
- Détermination des éléments majeurs :
- 3)- Phosphore ( Truog, Morgan-Barbier)
- 4)- Azote ammoniacal et nitrique
- 5)- Ca, Mg ( Complexométrie)
- 6)- K Assimilable
- 7)- K dans un engrais et analyse qualitative d'un engrais
- 8)- Fer libre
- 9)- Aluminium échangeable
- 10)- Capacité d'échange
- 11)-  $P_2O_5$  Méthode Blanchet
- 12)- Discussion des résultats d'analyses ( 1 H. 1/2)
- 13)- Examen.

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE  
DE NANCY

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'AGRONOMIE  
ET DES INDUSTRIES ALIMENTAIRES  
(E.N.S.A.I.A.)

30 bis, rue Sainte-Catherine - 54 - NANCY  
Tél. (28) 24.28.63

PRE-OPTION :

RELATIONS : PLANTES, MICRO-ORGANISMES, SOLS  
=====

Cette carte pluridisciplinaire doit servir de complément de formation mais également permettre d'entrevoir les différentes fonctions de l'Ingénieur dans un éventail assez large. En outre, elle indique les difficultés pour codifier les interactions entre sol-microorganismes et plantes.

Elle comporte des enseignements magistraux par des spécialistes, des travaux dirigés, des exposés par des professionnels qualifiés.

1. PRINCIPES et PROBLEMES CONCRETS de FERTILISATION

- Principales plantes cultivées - Plantes de grandes cultures ..... MM. JACQUIN et GRAS
  - Prairies ..... M. BONISCHOT
  - Forêts ..... M. BONNEAU
  - Cultures maraîchères ..... M. ANSTETT
  - Houblon ..... M. MAROKE
  - Informatique et fertilisation sur le plan régional M. REMY
  - Expérimentation sur le plan national ..... M. LECOMPTE
  - Liaison entre recherche et vulgarisation ..... M. HEBERT
  - Relation entre fertilisation et qualité de l'orge ( par un Ingénieur-Brasseur)
  - Relation entre fertilisation et qualité du lait ( par un Ingénieur-Laitier)
2. VISITES concernant des unités de production d'éléments fertilisants : mine et usine de synthèse 12 H.
3. TRAVAUX DIRIGES sur l'utilisation des radioisotopes en agronomie ( M. GUCKERT ) ..... 8 H.
4. Influence fongique sur l'activité biologique des sols ( Champignons pathogènes et symbiotiques)  
M. MANGENOT, Professeur à NANCY I ..... 6 H.  
Travaux dirigés M. PAYEN ..... 4 H.
5. Influence bactérienne sur la fertilisation naturelle des sols ( Effet Rhizosphère - Fixation d'azote -Toxicité)  
M. DOMMERGUES, Directeur de recherche au CNRS ..... 6 H.  
Travaux dirigés : Chercheurs du C.N.R..S ..... 4 H.

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE  
DE NANCY

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'AGRONOMIE  
ET DES INDUSTRIES ALIMENTAIRES  
(E.N.S.A.I.A.)

30 bis, rue Sainte-Catherine - 54 - NANCY

Tél. (28) 24.28.63

PRE-OPTION

PEDOLOGIE-BIOLOGIQUE

Cette carte réalisée en liaison avec l'Université de NANCY I permet aux étudiants de l'E.N.S.A.I.A., en raison de leur formation antérieure, de postuler au Certificat C<sub>4</sub> de Science du Sol.

Cet enseignement complémentaire a pour but de former le futur Ingénieur pour penser et agir en connaissance de cause sur tous les problèmes faisant intervenir le sol : pédologie appliquée - fertilisation - environnement - lutte contre la pollution - cultures spéciales - nutrition des animaux - qualité des produits alimentaires - urbanisme.

Cette pré-option est recommandée aux étudiants désirant suivre ultérieurement l'option mise en valeur des sols mais elle peut, dans la mesure des places disponibles, être envisagée par d'autres étudiants de 2<sup>ème</sup> année de l'ENSAIA. Elle comporte un enseignement magistral de M. DUCHAUFOR, Professeur à l'Université de NANCY I, Directeur du Centre de Pédologie-biologique du C.N.R.S. et concerne l'évolution des sols. D'autre part elle donne lieu à l'étude des différents profils pédologiques rencontrés en Lorraine et dans les Vosges.

CONFERENCES de M. DUCHAUFOR

37 H. 1/2 à raison de 2 cours par semaine, Lundi et Vendredi à 17 H.15, au 2<sup>ème</sup> semestre.

TOURNEES REALISEES en commun entre l'I.N.P. et l'UNIVERSITE de NANCY I, par MM. DUCHAUFOR, JACQUIN, BRUCKERT et GUCKERT, et comportant :

7 sorties d'une 1/2 journée.

Ce cours a pour but essentiel de définir et commenter les applications pratiques de plusieurs sciences fondamentales ; en effet, la fertilisation nécessite des connaissances de base indispensables concernant principalement :

- le substrat donc généralement le sol  
( agrologie et pédologie )
- l'utilisateur donc généralement la plante,  
( physiologie végétale )
- les conditions d'utilisation soumises d'une part aux contraintes du milieu ( climatologie et biologie des sols) et d'autre part aux critères économiques interprétés statistiquement.

Ce cours doit vous permettre d'établir à l'aide de documents ( données analytiques, cours polycopiés, manuels de fertilisation) un plan de fumure rationnel pour une exploitation donnée ou une culture déterminée.

Le cours polycopié ne correspond donc qu'à une fraction de l'enseignement et rassemble un ensemble de documents nécessaires à la compréhension de l'aspect théorique de la fertilisation.

- 1- Lois de la fertilité et expérimentation appliquée aux problèmes particuliers de fertilisation.
- 2- Etude théorique de la fertilisation azotée, avec comme thème principal l'aspect biologique de la minéralisation.
- 3- Etude théorique de la fertilisation phosphatée, avec comme thème principal, la migration des éléments minéraux à l'aide d'isotopes.
- 4- Etude théorique de la fertilisation potassique , avec comme thèmes principaux, les liaisons avec le complexe absorbant et les phénomènes d'interaction.
- 5- Etude théorique des éléments mineurs et des oligoéléments , avec comme thèmes principaux, les phénomènes de carence et toxicité.

D'autre part nous examinerons les divers aspects :

Technologiques :

- Fabrication des engrais simples avec visite au S.C.P.A.
- Fabrication des engrais composés avec visite du complexe de Carling.
- Visite commentée des stands de matériel de distribution au S.I.M.A.

Economiques :

- Conférence débat sur la législation et les systèmes de vente des engrais en France et dans le cadre du Marché Européen.

Pratiques :

- Exposés des étudiants préparés à l'aide de documents sélectionnés sur des exemples concrets de fertilisation.

Enfin, une synthèse nous permettant d'envisager le rôle de l'Ingénieur Agronome dans l'augmentation rationnelle de la fertilité des sols.

1ère P A R T I E

---

1 - DEFINITION HISTORIQUE

2 - LOIS de la FERTILISATION

## I° - P A R T I E

### DEFINITION HISTORIQUE et LOIS de la FERTILISATION

#### I - DEFINITIONS

Il nous faut tout d'abord différencier fertilité et productivité :

LA FERTILITE désigne la capacité inhérente pour un sol de fournir aux plantes des éléments nutritifs en quantité suffisante et en proportion convenable;

LA PRODUCTIVITE désigne la faculté de donner une récolte ; donc la fertilité correspond à l'un des facteurs de la productivité et ces facteurs peuvent être plus ou moins nombreux , citons entre autres :

##### 1-1 - Facteurs fonciers ou de milieu et comprenant :

- D'une part les conditions climatiques : pluviosité et sa répartition au cours des saisons , variation annuelle de température , luminosité, vents, E.T..P, etc...
- D'autre part, le volume utile du sol et sa capacité pour l'eau et l'air ; les propriétés physico-chimiques du sol en relation avec la texture et la structure des divers horizons ; la teneur en humus stable peut être classée dans ces facteurs en raison de sa modification très lente.

##### 1-2 - Facteurs techniques :

- 1,2-1 - Modification de structure de la couche labourée
- 1,2-2 - Apport d'éléments minéraux

A noter que s'il est relativement facile aujourd'hui de remédier à l'insuffisance des éléments fertilisants du sol par des engrais appropriés, il est par contre, en général, beaucoup plus difficile de corriger un excès nuisible ou toxique de certains éléments d'origine naturelle ou accumulés par l'homme.

- 1,2-3 - Choix des espèces et variétés des plantes cultivées.

#### II - HISTORIQUE DE LA FERTILISATION CHIMIQUE :

Avant 1840, les praticiens agricoles admettaient que seul l'humus fournissait les éléments nutritifs nécessaires au développement des végétaux ; néanmoins ; Bernard PALISSY indiquait déjà que les végétaux empruntent au sol des matières minérales. Ces notions ne furent acceptées qu'après la parution en 1840 du traité de " chimie organique appliquée à l'agriculture et à la physiologie " de LIEBIG ; cet auteur affirmait que les premières sources d'alimentation des végétaux proviennent du règne minéral.

Ensuite, l'industrie de l'alimentation des végétaux ou engrais a pris une extension très rapide ; tout d'abord, limitée aux éléments majeurs, N, P, K, elle se complète par la notion d'oligoéléments. Le développement fut tel que certains agronomes arrivèrent très rapidement à négliger le problème de l'humus et à considérer comme essentiel, voire comme exclusif, l'apport d'éléments fertilisants minéraux. Nous verrons par la suite les difficultés rencontrées pour obtenir un équilibre entre les éléments fournis par voie minérale ou organique.

°°

L'un des premiers problèmes consiste à déterminer la fraction d'éléments minéraux susceptibles d'être exportés du sol par une culture et à déterminer pour chaque élément son coefficient d'utilisation par la plante. Théoriquement les végétaux trouvent dans le sol des réserves minérales pour de nombreuses cultures successives. Cependant, il est bien évident que ces éléments nutritifs ne sont mis à la disposition des végétaux sous forme assimilable que très lentement. Il paraît donc très intéressant, lors de l'établissement d'un plan de fumure, de connaître les coefficients d'utilisation en fonction du sol et des plantes cultivées. A titre d'exemple, ce dernier coefficient a été déterminé par JORET pour la région du Nord, pour les éléments majeurs et pour différentes plantes :

	% N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Betteraves à sucre .....	2,8	6 - 7	15 - 25
Blé .....	2,2	4,5 - 7	15 - 25
Avoine .....	2,6	5 - 7	15 - 25

°°

De toutes façons la suppression de toute fumure se traduit par une baisse rapide de la productivité ; cette diminution, d'abord très rapide, se ralentit ensuite, mais se poursuit inexorablement. Pour assurer un rendement en culture extensive, surtout si l'on pratique la jachère ou l'apport d'engrais vert, les réserves du sol peuvent suffire momentanément ; en culture intensive il devient indispensable de compléter les éléments disponibles par des apports externes principalement sous forme minérale. Afin de vérifier avec plus de précision cette diminution de la fertilité, des essais pratiques ont été entrepris dès 1875 à Grignon par Delcreau, essais poursuivis par Guérillot, puis Morel. A titre d'exemple, ces variations enregistrées entre 1931 et 1937 indiquent la différence de rendement

en fonction d'apport de fumure pour une durée de 5 années.

	<u>Blé</u>		<u>Bet. 1/2 sucrières</u>	
	Rendement relatif	Rendement absolu	Rendement relatif	Rendement absolu
Fumure complète	100	31 qx	100	493 qx
Fumier seul ( 10 T Ha/an)	86	26	80	394
Sans engrais	50	15	36	177



En conclusion l'apport de fumier ne permet donc pas une restitution suffisante ni convenable pour obtenir de forts rendements car la fumure organique est un reflet du sol ; d'autre part, le fumier ne représente qu'une fraction des récoltes et son action lente se répartit sur plusieurs années en fonction de la nature du sol et du climat. A l'inverse, les engrais minéraux sont concentrés dans l'espace et le temps; connaissant le dosage et la forme de l'élément apporté, on peut prétendre, dans une certaine mesure en déterminer leur efficacité. La fumure minérale aura donc pour but de réaliser dans un sol donné, les conditions alimentaires les plus favorables au développement des plantes cultivées en vue d'obtenir un maximum de rendement quantitatif et qualitatif et ceci avec une marge bénéficiaire suffisante.

### III - LOIS GENERALES DE LA FERTILISATION

Sous le terme " lois de la fertilisation " on groupe certains principes régissant l'emploi des engrais ; bien que certains soient formulés mathématiquement, il s'agit plutôt d'idées directrices à adapter en fonction de nombreux facteurs.

#### 3. Loi de la restitution : ( Déhérain-Boussingault)

Il est indispensable de restituer au sol, afin d'éviter son épuisement, tous les éléments fertilisants prélevés par les récoltes.

Il faut tenir compte à la fois des éléments fondamentaux ( N, P, K, Ca ) des macro-éléments ( S, Mg, Na ) et des micro ou oligoéléments ( Mn, Cu, Co, Zn , etc... )

En supposant le sol fertile au départ, on peut concevoir le maintien de cette fertilité par restitution au sol des éléments exportés. Cette notion explique pourquoi de nombreux agronomes se sont efforcés de chiffrer les exportations par l'analyse des plantes. Tous les résultats obtenus ne concordent pas car la composition chimique du végétal n'est pas constante et dépend des facteurs climatiques de l'année. En résumé, il s'agit surtout d'ordres de grandeur intéressants à connaître, mais valables pour une variété donnée cultivée sur un sol caractéristique et dans des conditions climatiques bien précises.

Outre les exportations, il faut mentionner les pertes supplémentaires dues à des phénomènes physico-chimiques ( lessivage, interaction entre éléments chimiques - dégagement gazeux ) ou occasionnés par des processus biologiques.

Il faut toujours distinguer la quantité prélevée : éléments nutritifs absorbés par la plante, de la quantité exportée : éléments non restitués au sol lors du ramassage des récoltes.

Il est possible d'apporter des précisions supplémentaires à cette loi, par les additifs suivants :

### 3, 1-1 - Loi des avances :

Le sol doit contenir, à tous moments, une réserve en éléments fertilisants suffisante pour que les plantes trouvent toujours à leur disposition ce dont elles ont besoin. On cherche à éviter une limitation des rendements par le niveau alimentaire ; cependant, ces avances ne doivent pas être considérées en raison de plusieurs facteurs que nous étudierons plus loin ( loi du minimum - interactions - pertes ).

### 3, 1-2 - Loi de la dominante :

Chaque végétal ou fraction de végétal a une préférence pour tel ou tel élément minéral :

- N ..... Organes végétatifs ; graminées
- P ..... Graines, légumineuses
- K ..... Racines ou tubercules ; crucifères
- S ..... Crucifères

### 3, 1-3 - Loi de la restitution des éléments assimilables ( Voisin 1964 )

Il est indispensable pour maintenir la fertilité du sol de lui restituer non seulement les éléments assimilables prélevés par les récoltes, mais également les éléments assimilables qui en disparaissent par suite d'applications d'engrais ; ce terme " disparition " doit être compris dans le sens le plus large :

#### 3, 1-3-1 - L'apport d'un élément fertilisant peut favoriser le lessivage d'un autre élément :

- Entraînement direct du magnésium par les eaux de pluie du fait de l'application d'engrais potassiques ( Loi de masse, cf. Agrologie )

Entraînement indirect du magnésium dû à l'absorption de l'ion  $\text{NH}_4^+$  par les racines :  $\text{NH}_4^+$  quitte le complexe absorbant ; la plante libère simultanément des ions  $\text{H}^+$  qui viendront prendre la place de l'ion ammonium dans le complexe ; ces ions  $\text{H}^+$  en excès auront une action antagoniste sur les ions  $\text{Mg}^{++}$  ( loi d'action de masse ).

### 3,1-3-2 - Il existe également des phénomènes de transformation

Un apport de  $\text{NO}_3\text{NH}_4$  peut faire disparaître le  $\text{Cu}^{++}$  assimilable ceci entraînant une diminution de la teneur en cuivre de la matière sèche des végétaux ; en effet le cuivre est lié au complexe absorbant sous forme de chélatés dus à la matière organique ; l'apport de  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  favorise la minéralisation de cette matière organique et libère le cuivre sous forme de  $\text{CuNO}_3$  plus soluble que les ions chélatés. Comme la teneur minima pour la santé des animaux se situe aux environs de 8 p.p.m. dans les fourrages, l'addition au sol de  $\text{CuSO}_4$  supprime cette non assimilabilité et favorise en même temps la résistance à la verve.

Les applications d'engrais phosphatés ont tendance à diminuer la teneur en zinc assimilable. Comme il s'agit d'un effet cumulatif, on peut observer après un certain temps et pour des plantes sensibles, des signes de carence ( Lin ) ; ce phénomène peut s'expliquer soit par formation de phosphate de zinc insoluble, soit par freinage de l'absorption de cet élément.

### 3,1-3-3 - Des effets antagonistes peuvent apparaître

Action d'antagonisme des ions  $\text{K}^+$  provenant des engrais potassiques vis-à-vis des ions  $\text{Mg}$ ,  $\text{Ca}$  et  $\text{Na}$  ( Mc Naught 1959 ) et bore ( Woodruff 1960 ).

### 3,1-3-4 - Equilibre entre $\text{Mn}^{++}$ et $\text{Mn}^{+++}$ en fonction du pH

Un simple apport de  $\text{SO}_4(\text{NH}_4)_2$  peut permettre l'apparition de la forme assimilable  $\text{Mn}^{++}$ . A l'inverse les amendements calciques entraînent des carences en manganèse ( maladie des taches grises de l'avoine, stérilité chez les bovins ou ovins ).

### 3② - Loi du Minimum : ( Liebig 1862 )

Les rendements des récoltes sont proportionnels à la quantité de l'élément fertilisant présent au minimum dans le sol relativement aux besoins des végétaux.

Cette loi n'a conservé que son aspect qualitatif et elle s'énonce ainsi :

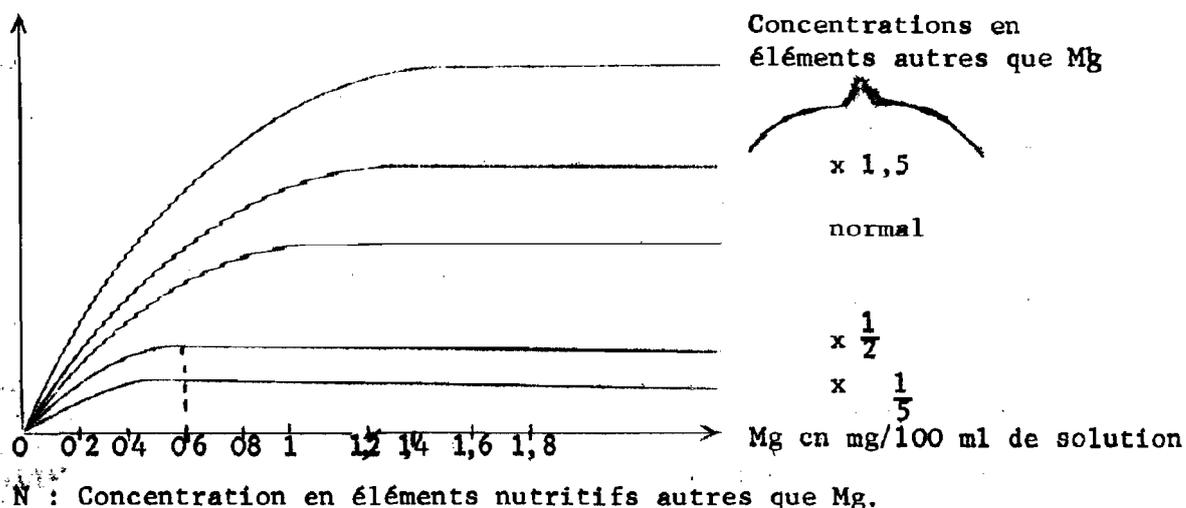
L'insuffisance d'un élément assimilable dans le sol réduit l'efficacité des autres éléments et, par suite, diminue le rendement des récoltes.

### 3,2-1 - Vérification expérimentale :

Cette loi peut être illustrée par les expériences de LAVOLLAY et LALOREY (1959) sur le développement de *Sterigmatocystis niger* (planche I)

Poids de matière sèche en mg.

PLANCHE I



Dans un milieu pauvre en substances nutritives ( $\frac{n}{2}$  ;  $\frac{n}{5}$ ) autres que le magnésium, l'addition de cet élément au delà d'une certaine concentration ne favorise plus la croissance de la moisissure, alors qu'elle est utile en milieu plus riche ; l'insuffisance des substances nutritives limite l'action du magnésium à un niveau d'autant plus bas que le milieu est plus dilué. Inversement, en présence d'une petite dose de magnésium, 0,6mg par exemple, l'augmentation des autres substances nutritives n'agit pas au delà de la dilution  $\frac{1}{2}$ . alors qu'elle agit jusqu'à des concentrations plus élevées en présence d'une dose suffisante de magnésium.

L'insuffisance d'un élément limite l'action des autres substances nutritives ; le facteur dont l'insuffisance limite l'action des autres correspond au facteur minimum ou facteur limitant

### 3, 2-2 - Applications agronomiques :

3, 2-2-1 : Cette loi entraîne une application pratique dans l'établissement de plans de fumures équilibrés. Mais ce n'est pas l'équilibre de la fumure elle-même qui importe, mais celui de la somme des éléments fournis par le sol et par les engrais. A un sol déséquilibré il convient d'appliquer une fumure déséquilibrée en sens inverse, pendant un nombre d'années limité. A la notion de fumure équilibrée, il convient d'adjoindre celle de fumure équilibrante. A l'inverse on ne saurait, sans inconvénient enrichir indéfiniment le sol en ces éléments, ce qui le déséquilibrerait en sens inverse de son état initial. A partir d'un certain taux d'enrichissement du sol, il convient de faire en sorte que le bilan des gains et des pertes soit approximativement compensé pour chaque élément au cours d'une rotation. La fumure équilibrée pourrait être définie comme celle qui assure l'entretien des réserves, une fois celles-ci devenues suffisantes pour assurer l'optimum des rendements avec l'appoint des doses de restitution.

3,2-2-2 - Les proportions optimales des divers éléments à appliquer dépendent de multiples circonstances locales et temporaires : composition naturelle du sol, système de culture actuel et passé, circonstances météorologiques des saisons antérieures. Présenter les engrais composés ( N, P, K,) comme équilibrés risque très souvent, d'amener un véritable déséquilibre des éléments fertilisants, particulièrement de ceux non invoqués. En l'absence de tout renseignement sur la composition chimique de la parcelle à traiter, il peut s'agir d'un palliatif auquel l'adjonction d'un ou plusieurs éléments se révélera souvent utile. Il est préférable d'entretenir régulièrement le volant des réserves sans oublier que tous les facteurs sont solidaires ; en effet, il est très difficile de déterminer le seuil auquel intervient l'influence minimale de l'un d'entre eux. Cependant, appliquée sans discernement cette notion peut conduire à des erreurs, à des dépenses inutiles sinon nuisibles. Les formules des engrais complexes dits " équilibrés " devraient évoluer au fur et à mesure de l'évolution de la richesse du sol sous l'influence des cultures.

L'équilibre de la fumure est difficile à obtenir et une formule de fumure n'est pas équilibrée en elle-même, elle doit tendre à établir dans le sol un équilibre entre les éléments nutritifs dont finalement le comportement de la plante sera en définitif le réactif le plus sûr.

Il est possible de distinguer trois cas de déséquilibre :

a) Déséquilibre avec excès relatif inutile, mais non nuisible

L'exemple suivant de fumures sur pomme de terre indique nettement que la fumure phosphopotassique sans azote n'a aucun effet alors qu'elle augmente fortement le rendement en présence d'azote.

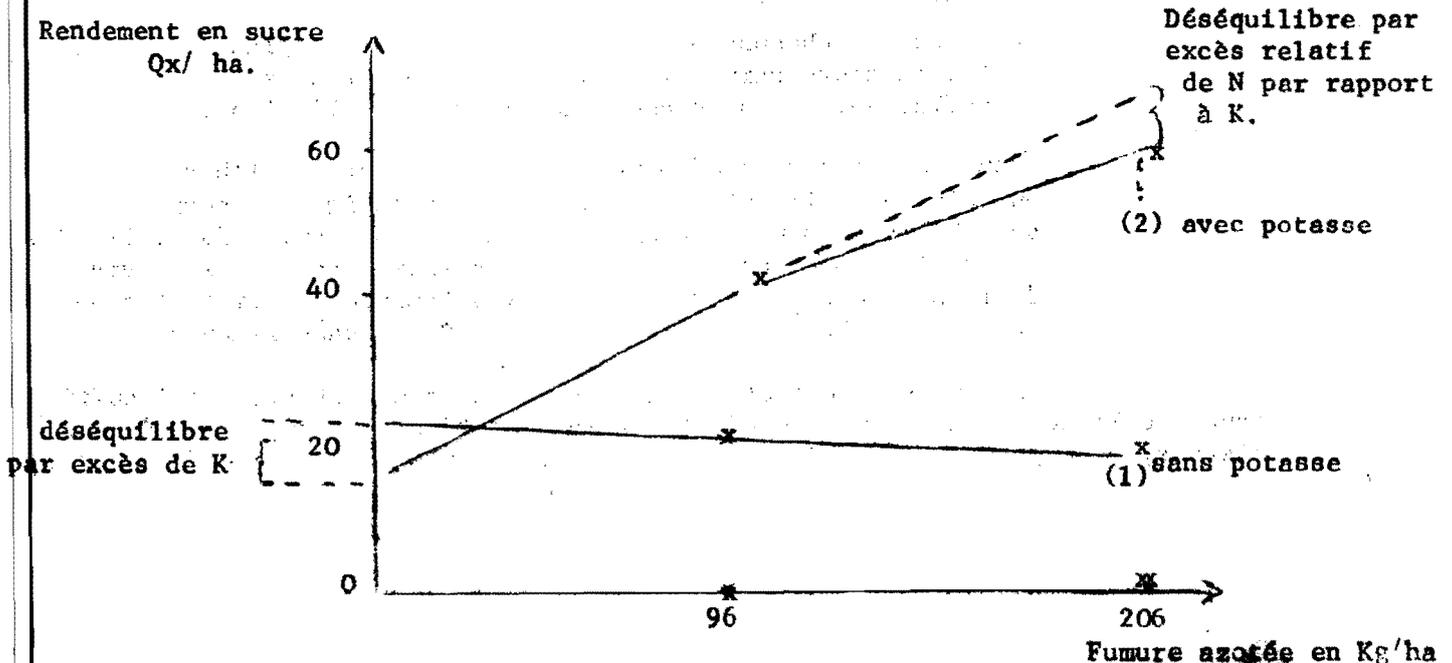
Fumure .....	0	PK	NK	NP	NPK
Rendement .....	88	89	114	107	151

b) Déséquilibre avec réduction d'effet utile

D'après MITSCHERLICH, l'addition d'un élément qui n'est pas à l'optimum produirait toujours un effet utile mais d'autant plus petit que les autres facteurs sont plus déficients. Il n'est pas rare d'observer que de l'azote appliqué seul, et un phosphate appliqué seul augmentent tous deux le rendement d'une même récolte sur un même sol.

c) Déséquilibre typique avec excès relatif et nuisible d'un élément.

PLANCHE II



La planche II résume les rendements obtenus au cours d'une culture de betteraves à Rothamsted, avec une fumure azotée croissante avec ou sans apport de potassium.

Fumure N Kg/ha .....	0	96,3	206
Rendement en { sans potasse .....	20,4	20,2	18,5
Sucre qx/ha { avec potasse .....	14,2	39,3	59,4

3,2-2-3 : La richesse du sol susceptible d'assurer l'optimum de nutrition du végétal varie en fonction des espèces et des variétés pour chaque élément selon l'aptitude propre de chaque plante, à s'alimenter en un élément, ou selon ses besoins internes.

3,2-2-4 : Le niveau optimum d'un élément varie en fonction du niveau de fertilité conformément à la loi du minimum, le sol doit être apte à alimenter en chaque élément les plantes avec une intensité d'autant plus grande que les autres facteurs de la végétation sont plus favorables, ceci afin de réaliser pleinement le potentiel de production de ceux-ci.

3,2-2-5 : Il est nécessaire au cours de l'apport d'engrais de corriger tout déséquilibre minéral du sol de manière à obtenir une plante de haute qualité biologique, tout en obtenant le plus fort rendement compatible avec cette haute qualité biologique VOISIN (1964). En effet, rendement et qualité biologique ne varient pas forcément de façon parallèle. Or, cette qualité biologique peut nuire à la santé des animaux comme en témoignent les quelques faits suivants :

- Le déséquilibre Na, Mg, K est une des causes principales de la tétanie d'herbage.
- Une carence en Mn des prairies entraîne la stérilité chez les bêtes mises à l'herbage.
- La pauvreté des plantes en vitamines favorise les hypo-vitaminoses, or les teneurs en Mn - Ca - K du sol interviennent sur la synthèse de la vitamine C<sup>n</sup> par les plantes ( Scharrer 1957 ).
- Le manque de phosphate du sol amène certaines plantes, comme le trèfle souterrain à fabriquer des quantités excessives d'isoflavone, une substance dangereuse pour l'animal.
- L'augmentation du rendement en protéine brute de l'herbe entraîne une diminution de la valeur biologique en corrélation avec l'abaissement du taux de lysine ( Schupham, 1958 ). Il existe également un optimum de la nutrition azotée vis-à-vis de la synthèse de la riboflavine ( vitamine B<sub>2</sub> ) puissant protecteur contre certains colorants azoïques cancérogènes.

Nous voyons donc toute l'importance que peut entraîner l'insuffisance ou l'excès d'un élément minéral sur la qualité biologique des produits obtenus, donc par cet intermédiaire, sur le métabolisme de l'individu vivant.

Or, si la qualité biologique des aliments de l'homme ne présente pas encore un caractère commercial marqué, cette qualité prend une importance économique réelle si les animaux sont nourris par les produits de la ferme, : ex. tétanie d'herbage, ataxie enzootique, stérilité. Si la plupart des travaux sur les engrais considèrent l'effet de ceux-ci en fonction d'une augmentation de rendement, il ne faut pas négliger les modifications pouvant intervenir sur la composition des plantes car un déséquilibre minimum dans le sol peut entraîner une réaction brutale du métabolisme animal.

3 <sup>3</sup> - Loi des rendements décroissants ou des excédents moins que proportionnels (Mitscherlich)

L'apport de doses croissantes d'engrais entraîne des augmentations de rendement de plus en plus faibles au fur et à mesure que les doses s'élèvent.

3,3-1 - Cette loi peut être matérialisée par les diagrammes ci-dessous correspondant aux rendements obtenus avec des doses croissantes d'un élément fertilisant déficient, tous les autres facteurs restant égaux.

Rendement

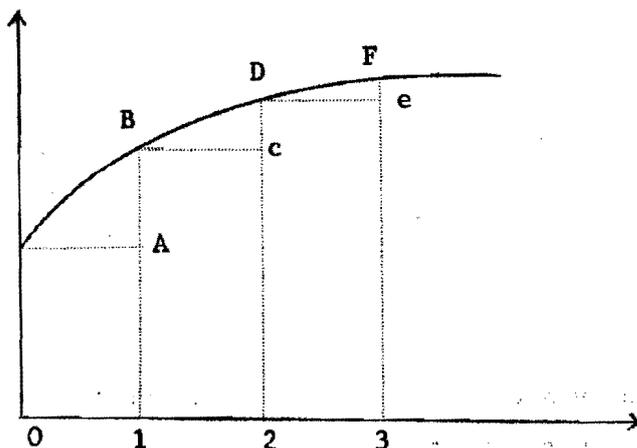


PLANCHE III

Élément non toxique  
( ex. K. )

Dose d'élément fertilisant appliqué

Rendement

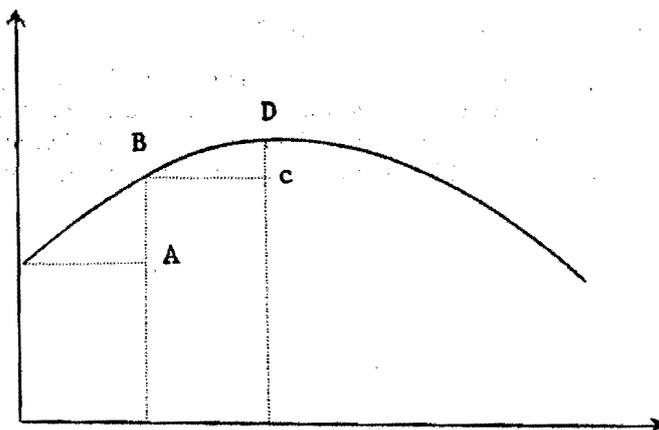


PLANCHE IV

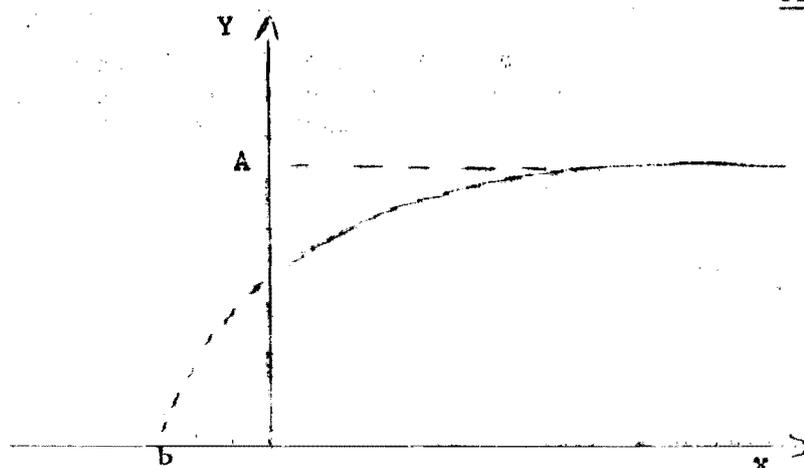
Élément toxique à forte dose  
( ex. N )

Dose d'élément fertilisant.

Ce diagramme peut commencer par une portion de droite (apport modéré d'azote) puis des doses additionnelles égales produisent chacune une augmentation de rendement plus petite que la précédente (CD plus petit que A B)

3,3-2 - Mitscherlich a essayé de formuler quantitativement cette loi ; il a postulé que des applications supplémentaires égales d'élément fertilisant produisent chacune une augmentation de rendement proportionnelle à la différence :  $A - y$  donc de plus en plus petite au fur et à mesure que le rendement s'approche du maximum.

PLANCHE V



En considérant les valeurs suivantes de la courbe ci-dessus :

$x$  = doses d'éléments fertilisants appliquées

$y$  = rendement

$A$  = rendement maximum

$b$  = quantité d'éléments fertilisants fournie par le sol

$c$  = est un coefficient d'efficacité spécifique du facteur étudié ; selon Mitscherlich, ce coefficient serait constant et par conséquent indépendant de la plante et du niveau des autres facteurs de croissance. En fait,  $c$  dépend du milieu (surtout s'il existe une interaction) et du végétal.

On définit :

$$\frac{dy}{dx} = (A - y) c$$

En intégrant :  $\text{Log } (A - y) = \text{Log } A - cx$

d'où  $y = A (1 - e^{-cx})$

Ou, en développant en série :

$$\frac{y}{A} = 1 \left( 1 - \frac{cx}{1} + \frac{c^2 x^2}{2} + \dots \right)$$

Si on se limite au 1er terme :  $\frac{y}{A} = cx$  ou  $y = Acx$

Lorsque le sol renferme déjà une quantité  $b$  d'élément fertilisant considéré :

$$\text{Log } (A - y) = \text{Log } A - c(x + b)$$

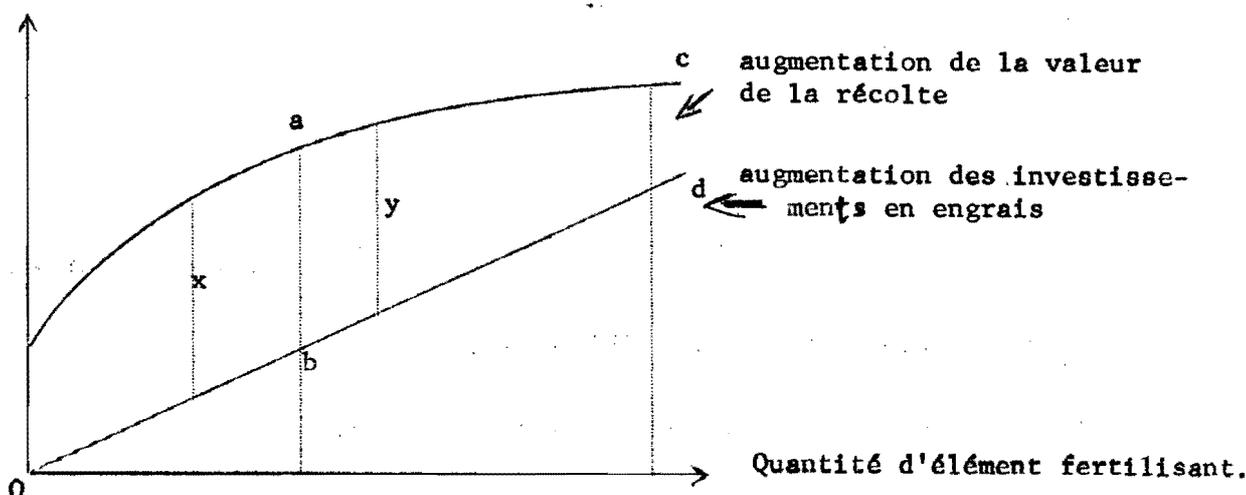
et  $y = A(1 - e^{-c(x+b)})$

La courbe théorique est asymptotique. Or nous avons vu qu'il existait un maximum de croissance au delà duquel la courbe redescend. Mitscherlich négligeait donc les phénomènes de toxicité aussi il s'est efforcé d'introduire (1928) des termes correctifs tel que :  $e - Kx^2$  ; ce coefficient a pour but, lorsque  $K$  devient assez grand, de passer de la courbe originelle asymptotique à la courbe expérimentale.

3, 3-3 - A noter qu'il existe au point de vue technique une dose optimum déterminant le rendement maximum. Mais cette dose dépasse souvent la dose limite au point de vue économique ( planche VI.)

Bénéfice

PLANCHE VI



En effet, le bénéfice de l'agriculteur correspond à la différence entre le montant des ventes de sa récolte et le coût d'apport des engrais. Sur le graphique ci-dessus, il est représenté par la distance entre les deux courbes. La droite figure le coût des engrais, proportionnel à la quantité épanchée, l'autre courbe représente le rendement des récoltes (converti en argent). Ce bénéfice maximum pour la distance  $a b$  indique qu'un rendement économique  $a$  est inférieur au rendement théorique  $c$ .

( bénéfice maximum )

( rendement maximum )

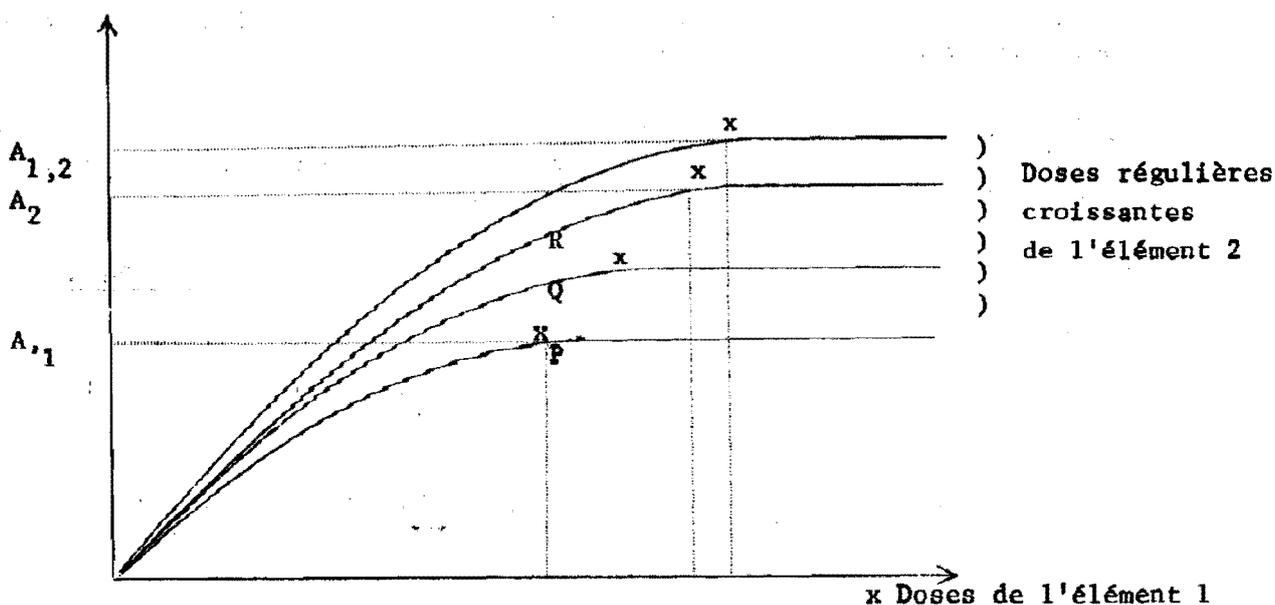
3.4 - Loi d'interactions des facteurs de croissances (M.)

Il y a interaction lorsque deux ou plusieurs causes agissant simultanément, produisent un effet différent de la somme des effets qu'elles produiraient séparément. L'interaction est dite positive si l'effet des causes conjuguées est supérieure à la somme des effets séparés. L'interaction est dite négative dans le cas contraire.

L'interaction de deux éléments fertilisants est représentée, d'après Mitscherlich, par une famille de courbes du modèle de la planche VII, ci-dessous, tous les autres facteurs étant supposés constants.

Rendement

PLANCHE VII



$A_2$  = rendement maximum de l'élément n°2

$A_{1,2}$  = rendement maximum des éléments 1 et 2 combinés.

Chacune de ces courbes traduit l'action de doses croissantes de l'élément n°1 à quantité constante de l'élément n°2. De même des doses régulièrement croissantes de l'élément n°2 produisent, à niveau constant de l'élément n°1, des rendements représentés par des points P, Q, R augmentant vers un maximum  $A_2$  selon la loi des effets croissants.

Ainsi, chaque dose de l'élément produit une fraction définie du maximum particulier  $A_2$ , qui est lui-même une fraction définie du rendement maximum  $A_{1,2}$  que l'on peut obtenir avec des doses croissantes des deux éléments. En conséquence, si les deux éléments varient simultanément le rendement peut être formulé par la relation :

$$y = A_{1,2} \times f_1 \left( \frac{x_1}{x_1 + b_1} \right) \times f_2 \left( \frac{x_2}{x_2 + b_2} \right)$$

où  $f_1$  et  $f_2$  désignent des fonctions croissant de 0 à 1 (1ère loi de Mitscherlich).

Le produit  $A_{1,2} \times f_1 (x_1 + b_1)$  est le rendement maximum que l'on peut obtenir avec des doses croissantes de 2, pour un niveau donné de 1 et vice-versa.

En définitif, l'effet de deux éléments agissant simultanément correspond au produit des effets relatifs de chacun. Une quantité donnée de chaque élément favorise d'autant plus la croissance, en valeur absolue que l'autre est plus près de son optimum.

D'une façon générale, si tous les éléments fertilisants varient, le rendement peut être formulé par la relation :

$$y = A_0 \times f_1 (x_1 + b_1) \times f_2 (x_2 + b_2) \times f_3 (x_3 + b_3) \times \dots$$

où  $A_0$  désigne le rendement que l'on obtiendrait dans des conditions générales données (climat, structure du sol, variété cultivée, etc...) en portant à l'optimum tous les éléments nutritifs - toutes les fonctions atteignant alors l'unité. Ce rendement maximum  $A_0$ , peut être pris comme définition quantitative de la fertilité, puisqu'il correspond à la pleine réalisation des aptitudes générales du milieu pédoclimatique (ensemble des conditions de sol et de climat).

Cette façon de formuler l'interaction des divers éléments fertilisants est particulièrement simple, puisque l'effet relatif de chaque élément serait indépendant de tous les autres facteurs, que l'on pourrait définir une quantité pratiquement optimum de chaque élément sans tenir compte d'aucune autre condition.

Ce que l'on peut reprocher à la théorie de Mitscherlich c'est précisément d'être trop simple, trop schématique, car en fait, l'effet relatif d'une même dose de chaque élément peut varier largement selon les autres facteurs. Cependant la formule de Mitscherlich, ne doit pas être tenue pour un simple jeu mathématique. Les multiplications qui y figurent et qui en constituent peut être l'essentiel, ont un sens réel : il est certain que l'action conjuguée des divers facteurs de croissance n'est pas la somme de leurs actions séparées - ce qui serait le cas s'ils agissaient indépendamment les uns des autres, et que l'action de chacun augmente, entre certaines limites, avec le niveau des autres excepté dans les cas, assez rares, de déséquilibre typique. Des résultats concrets concernant l'interaction potasse et azote illustreront l'application de cette loi.

2ème P A R T I E

---

EXPERIMENTATION en FERTILISATION

## II° - P A R T I E

### EXPERIMENTATION en FERTILISATION

Cette partie du cours peut se subdiviser en trois parties :

- 1- Détermination d'un protocole expérimental,
- 2- Réalisation pratique des essais,
- 3- Interprétation des résultats.

Plusieurs sociétés productrices d'engrais possèdent un service d'expérimentation et de vulgarisation très structuré et efficace. Comme en expérimentation pratique il s'avère indispensable d'homogénéiser les expériences ou les démonstrations, nous avons emprunté aux publications des services agronomiques plusieurs passages relatifs à ce sujet.

En ce qui concerne les bases de l'expérimentation en fertilisation et les modes de calcul statistique vous disposerez de l'excellent fascicule mis au point par M. LECOMPT du S.P.I.E.A (1965) ; pour la réalisation pratique des essais la brochure éditée par le S.C.P.A. étant épuisée (QUIDET et MASMEJEAN, 1962) nous en avons reproduit les faits essentiels.



### CHOIX DU TERRAIN

#### I- CONSIDERATIONS TECHNIQUES

##### A - Nature du sol

Les essais doivent être, en principe, établis sur des sols représentatifs d'une région et non sur des sols de nature exceptionnelle, sinon leur portée sera très réduite. Lorsqu'on voudra étudier l'action d'un élément fertilisant, on recherchera de préférence des sols moyennement fournis en cet élément, surtout s'il s'agit d'éléments susceptibles d'être retenus par le pouvoir absorbant du sol et par là même doués d'arrière-effets qui peuvent durer plusieurs années.

En l'absence d'un réseau d'essais déjà existant, il n'est pas toujours possible de se baser sur l'analyse chimique du sol pour prévoir la réaction de ce sol aux engrais. L'interprétation des analyses exige une connaissance approfondie des conditions locales et une grande expérience. Il ne faut pas se laisser arrêter par des normes établies pour des sols de nature sinon très différente, du moins situés dans des régions soumises à des conditions climatiques parfois très éloignées de celle où l'on opère. Ajoutons que les normes calculées il y a longtemps ne sont plus toujours valables en raison des changements de méthodes d'analyse mais aussi du fait de l'accroissement des rendements consécutifs à l'amélioration des techniques culturales (variétés, etc...)

Suivant la nature des engrais étudiés, on pourra être amené à rechercher des sols acides, neutres ou alcalins ou à expérimenter dans des sols de différentes natures.

Dans les essais d'engrais potassiques, la teneur et la nature de l'argile sont importantes à considérer.

#### B - Homogénéité

Rechercher de préférence un terrain.

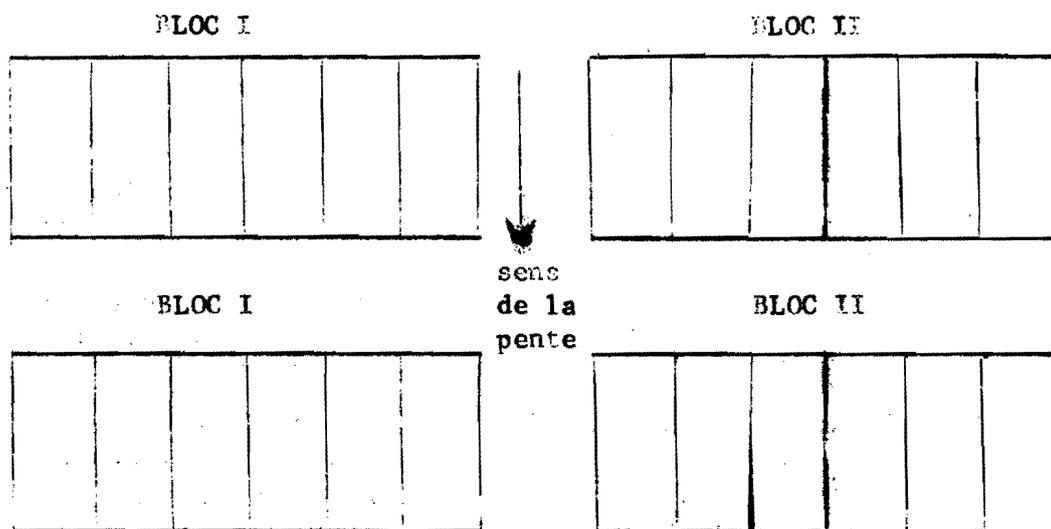
- horizontal ou en pente légèrement et régulièrement inclinée,
- présentant une seule nature de sol et de sous-sol sur toute son étendue (pas de veines de pierre, de taches d'humidité ou de couleurs différentes, etc...)
- non entaché d'hétérogénéité au cours des dix dernières années par la juxtaposition de cultures différentes (parcelllement, haie, etc...)
- éloigné des bâtiments, bois (dégâts de gibier) et rideaux d'arbres.

Il est indispensable de contrôler l'homogénéité du champ avant la mise en route de l'essai en effectuant des prélèvements de sol et de sous-sol en différents points du champ (voir ci-après). Ces prélèvements devront être soumis à une analyse physico-chimique complète.

Le contrôle de l'homogénéité du terrain par l'examen de la culture uniforme qui précède l'essai, voire la récolte de cette culture divisée en parcelles factices, est utile mais ne permet pas de préjuger ce qui se passera les années à climat extrême où les défauts d'homogénéité seront accusés.

Une légère hétérogénéité n'est pas toujours un obstacle redhibitoire à l'implantation d'un essai, lorsqu'on connaît son orientation et à la condition d'en tenir compte. On disposera par exemple les blocs de telle sorte que chacun d'entre eux soit aussi homogène que possible et, dans chaque bloc, le grand axe des parcelles devra être parallèle au sens de variation de la fertilité.

Si on dispose un essai sur une légère pente, les blocs seront placés les uns à côté des autres ou les uns en dessous des autres, les parcelles étant situées les unes à côté des autres dans le sens de la pente, et on utilisera de préférence des parcelles allongées.



### C - Prélèvements d'échantillons de terre

#### a) Lors de la création d'un champ

##### I° Etude de la nature et de l'homogénéité du sol

Lors de l'établissement d'une culture expérimentale, le sol doit être jugé du double point de vue de sa nature et de son homogénéité. Il faudra faire une série de prélèvements intéressant le sol ( zone de terre remuée par les instruments aratoires : 20 à 25 cm d'épaisseur en général ) et le sous-sol ( entre 20-25 et 40-50 cm de profondeur) sur une superficie assez vaste pour permettre l'implantation de l'essai dans la partie la plus convenable du champ.

On procédera comme suit :

- a) Déterminer sur un plan les zones ( une dizaine par hectare ) où doivent être effectués les prélèvements.
- b) Préparer autant de paires de sacs ( sol et sous-sol) qu'il y a de zones à prospecter.
- c) Faire à la sonde, dans chaque zone, une quinzaine de prélèvements répartis au hasard pour constituer un échantillon d'environ 1 kg pour le sol et autant pour le sous-sol.

Reporter sur le plan les numéros des sacs avec indication de la nature des prélèvements ( sol ou sous-sol ).

Sur prairie naturelle, les échantillons de terre seront prélevés entre 0 et 10 cm de profondeur, le sous-sol étant constitué par les 15 à 20 cm sous-jacents.

Sur prairie temporaire, on opérera comme sur les terres cultivées ( voir ci-dessus).

## 2° Fosse pédologique

Pour étudier la nature du sol et du sous-sol sur une certaine épaisseur, il est bon de creuser une fosse de 1 m à 1 m 50 de profondeur sur la bordure extérieure du champ.

Sur le profil ainsi découvert, apparaîtront des horizons plus ou moins tranchés, de couleur et de nature différentes, correspondant à des zones de terrain plus ou moins évoluées avec le temps.

### b) Prélèvements périodiques

Ces prélèvements destinés à l'étude de la variation des éléments N, P, K, Ca, Mg, etc... du sol et du sous-sol doivent toujours être effectués sur les mêmes emplacements.

Lorsqu'on prévoit, à la création d'un essai, d'effectuer par la suite des prélèvements périodiques, il est indispensable de constituer, dès le début, un échantillon de sol, voire de sous-sol, sur chacune des parcelles. Dans chaque parcelle, on fera une quinzaine de sondages, répartis au hasard, pour constituer un échantillon moyen.

Périodicité des prélèvements : environ 5 ans entre deux prélèvements, sinon, en raison du pouvoir tampon du sol ( pouvoir absorbant), l'analyse n'indiquera pas de différences significatives d'un prélèvement à l'autre. Opérer de préférence après la même culture.

### c) Remarques

#### 1° - Prélèvements à la bêche

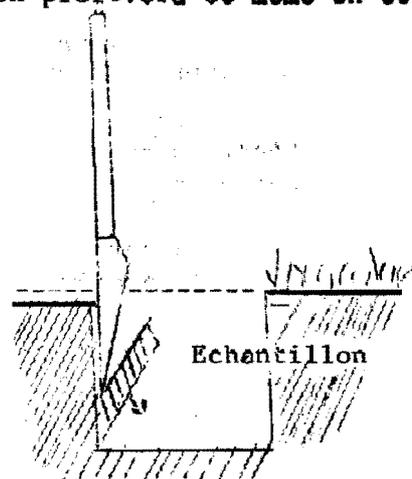
Lorsqu'il ne sera pas possible d'utiliser la sonde, on se servira d'une bêche. Après avoir débarrassé la surface du sol de la végétation et des détritiques qui pourraient la recouvrir, on creusera un trou et, sur l'une des faces, on découpera une tranche de terre ( voir figure ). Après élargissement et approfondissement du trou, on prélèvera de même un échantillon du sous-sol.

Les différents échantillons de sol provenant de la même zone seront mélangés et on prélèvera environ 1 kg ( échantillon moyen ) destiné à l'analyse.

On procédera de même pour le sous-sol.

#### 2° Epoque des prélèvements

Les prélèvements de sol pour l'analyse seront effectués de préférence à l'automne, après l'enlèvement des récoltes et avant l'épandage des engrais.



Prélèvement de terre à la bêche

#### 3° - Renseignements accompagnant les échantillons de terre :

Afin de faciliter l'interprétation des résultats par le Laboratoire qui effectuera les analyses, les échantillons de terre devront toujours être accompagnés d'une fiche de renseignements au dos de laquelle figurera le plan du champ, avec report des numéros correspondant aux emplacements des prélèvements.

- 2 - CONSIDERATIONS d'ORDRE PSYCHOLOGIQUE

A - Qualités de l'Agriculteur

L'Agriculteur chez lequel on réalise un essai doit être un cultivateur évolué, susceptible de comprendre tout l'intérêt de l'essai qui lui est en partie confié. Il doit être sérieux, souple et ponctuel et doit placer les besoins de l'essai sur le même pied que ceux de ses propres cultures.

Le fait, pour l'expérimentateur choisi, d'être bon praticien et d'avoir une bonne réputation dans la région est important, surtout lorsqu'il s'agit d'un essai de vulgarisation destiné à être visité par d'autres agriculteurs.

B - Emplacement du champ

S'il s'agit d'un essai de vulgarisation, l'emplacement de l'essai revêt plus d'importance que dans le cas d'un essai de recherche. On choisira, de préférence, un champ d'accès facile, si possible près d'une route fréquentée par les agriculteurs.

Pour un essai de recherche, la qualité du terrain et son homogénéité priment son emplacement.

Quels que soient les soins de l'expérimentateur et le dispositif employé, il n'est jamais possible d'éliminer complètement les inconvénients dus à l'hétérogénéité du sol ; aussi, devra-t'on toujours rechercher des champs d'essais aussi uniformes que possible afin de minimiser les causes d'erreurs et accroître les chances de réussite.

## REALISATION ET CONDUITE DES ESSAIS

Il ne suffit pas d'avoir défini le but d'une expérimentation, choisi un dispositif approprié et trouvé un terrain convenable ( la conduite de l'essai revêt une très grande importance : c'est d'elle que dépend la précision des résultats, par conséquent la valeur des conclusions qu'il est possible d'en tirer.

Ce chapitre réunit des renseignements d'ordre pratique qui sont utiles à connaître pour la mise en place et la conduite des essais.

### 1 - Etablissement du plan.

Le plan de l'essai est établi lorsqu'on connaît le dispositif choisi et le terrain dont on dispose. Il est fonction des cultures pratiquées, de l'outillage et de la main-d'oeuvre disponibles.

C'est lors de l'établissement du plan que doivent être précisées les dimensions des parcelles, la disposition des blocs, la largeur des fourrières et, si besoin est, des allées.

#### A - Dimensions des parcelles

Les dimensions des parcelles seront fonction du rendement des cultures et des quantités qu'il est nécessaire de récolter pour conférer aux résultats une précision suffisante. Elles dépendront, en outre, du matériel utilisé ( épandeur d'engrais, semoir ou planteuse, machines de récolte, etc..)

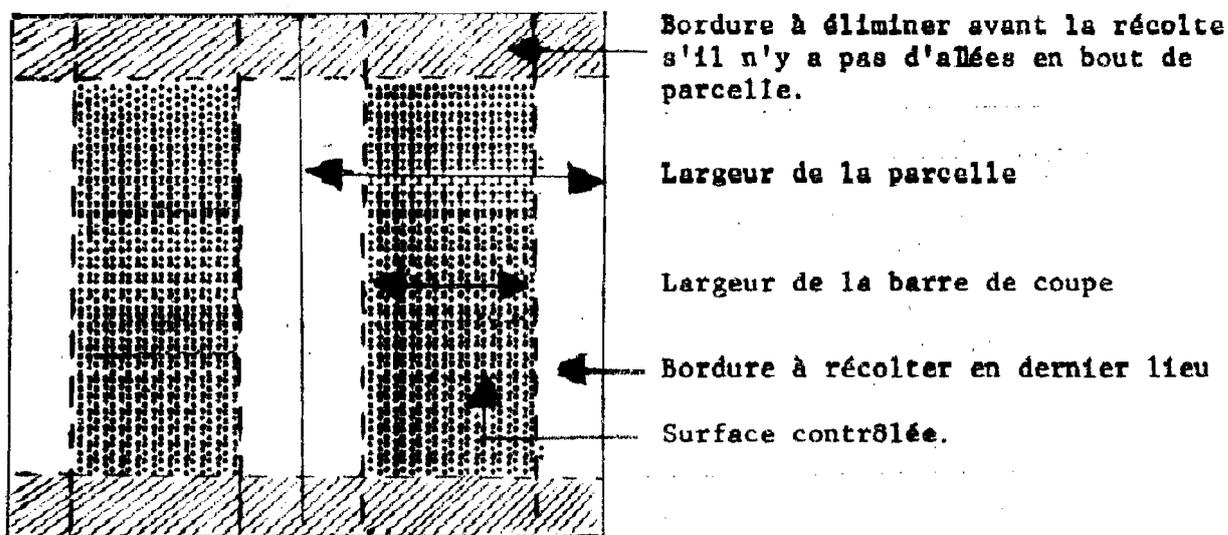
Il sera toujours préférable de réaliser des parcelles de petites ou moyennes dimensions, l'hétérogénéité du terrain augmentant en même temps que la surface. L'argument d'après lequel les agriculteurs ne se laissent pas convaincre par de tels essais tombe devant la nécessité d'obtenir des résultats rigoureux.

Céréales et plantes à graines ( colza, etc...) - Les essais avec répétitions, sur céréales, exigent pratiquement l'utilisation de la moissonneuse-batteuse à la récolte. Les erreurs de pasée sont beaucoup plus réduites qu'avec la moissonneuse-lieuse. Celle-ci exige la manutention des gerbes avec risque d'égrenage, de dégâts d'animaux ( oiseaux, rongeurs ), de mélange de gerbes appartenant à des parcelles voisines lorsque le battage n'a pas lieu sur le champ, etc... Par ailleurs, la moissonneuse-batteuse permet une économie de temps considérable.

On utilisera de préférence une moissonneuse-batteuse à coupe frontale qui permettra de déterminer avec exactitude la surface récoltée.

La longueur des parcelles doit permettre de récolter 30 à 80 kg de grains en un seul passage de moissonneuse-batteuse, ce qui correspond à des parcelles de 40 à 100 m de long. Il est nécessaire de prévoir, à l'extrémité des parcelles, quelques mètres qui seront récoltés avant l'essai, par exemple par un passage en travers de la moissonneuse-batteuse.

La largeur des parcelles en fonction de la largeur de coupe de la machine. On adoptera une fois et demie à deux fois la largeur de la barre de coupe de manière à laisser des bordures suffisantes entre les bandes récoltées.



Plan de deux parcelles juxtaposées, montrant les parties à éliminer (bordures) lors de la récolte.

Par exemple, les parcelles d'essai de fumure sur céréales auront une largeur d'environ 5 mètres et une longueur de 50 mètres en moyenne, ce qui correspondra à une superficie de 2,5 ares.

Lorsqu'on utilisera une moissonneuse-batteuse à barre de coupe étroite (moins de 2 mètres), on pourra envisager des parcelles de plus petites dimensions.

Exceptionnellement, si le terrain ne permet pas de disposer d'une longueur suffisante pour récolter en un seul passage 30 à 80 kg de grains, il faut prévoir des parcelles plus larges sur lesquelles on fera deux ou plusieurs passages à pleine coupe avec la moissonneuse-batteuse ; mais on pèsera ensemble la récolte des différents passages en provenance de la même parcelle.

Dans le cas d'essais permanents, les dimensions des parcelles seront établies pour permettre la récolte des céréales, les plantes sarclées n'exigeant pas de parcelles aussi grandes. Il faudra cependant tenir compte des dimensions des semoirs, planteuses et machines de récolte, nécessaires aux cultures de l'assolument autres que les céréales.

Cas particulier du riz : Les indications précédentes s'appliquent au riz. Pour cette culture, on sera souvent amené à prévoir des parcelles un peu plus larges, les moissonneuses-batteuses utilisées pour le riz étant généralement de grandes dimensions.

Le plan du dispositif sera établi de telle sorte que l'essai puisse être implanté à l'intérieur d'un même clos, des différences importantes, notamment dans les conditions de mise en eau, pouvant exister d'un clos à l'autre.

Les parcelles seront étroites et allongées et auront la longueur totale du clos ou la moitié de celui-ci, si l'on peut placer deux parcelles bout-à-bout.

Il y a avantage à éliminer de l'essai la zone d'arrivée d'eau, celle-ci pouvant causer une hétérogénéité contre laquelle il est impossible de remédier ( eau plus froide ).

Plantes sarclées : maïs, pommes de terre, betteraves, etc... - Il est nécessaire de pouvoir récolter 100 à 200 pieds par parcelle, sans compter les plants de bordure ( 2 rangs de chaque côté et 1 à 2 mètres à chaque extrémité de rang, à éliminer de la pesée). Ceci correspond à des parcelles de 0,5 à 1 are en moyenne. Dans les essais ou l'épandage d'engrais se fait à la main, la forme des parcelles peut se rapprocher du carré, sinon il est préférable de faire des parcelles allongées pour faciliter le passage de l'épandeur. Dans le cas particulier des essais avec localisation de fumures, réalisés à la machine, il faut prévoir des parcelles étroites et très allongées.

Dans le cas du maïs et de la betterave, pour assurer un peuplement régulier, il y a intérêt à faire un semis assez dense et à rétablir une population normale par éclaircissage.

Prairies : - Lorsque l'essai comporte des répétitions, il est préférable de prévoir des parcelles de petites dimensions ( 25 à 100 m<sup>2</sup> en fauche, 100 à 200 m<sup>2</sup> en pâture).

Les parcelles trop grandes augmentent les risques d'hétérogénéité du sol et de la flore. Sur les parcelles de taille réduite, les différences entre traitements sont également plus visibles.

En pratique, dans le cas des prairies de fauche, il faut pouvoir peser 50 à 100 kg d'herbe verte à la récolte. Si l'on opère avec une moto-faucheuse, ce qui donne les résultats les plus précis, il est commode de ne passer qu'un andain par parcelle ; ceci nécessite des parcelles longues et étroites : la largeur variera entre 5 m et 10 m et la longueur entre 10 m et 30 m, suivant qu'on opérera sur prairie de fauche ou de pâture.

Vignes : - Dans les essais de fumure, il faut compter un minimum de 2 rangs de bordure de chaque côté de la parcelle et prévoir 1 à 3 rangs à récolter pour contrôler au moins 100 pieds, ce qui donnera des parcelles de 5 à 7 rangs.

Pour faciliter le contrôle à la récolte, les parcelles porteront de préférence sur des rangs entiers plutôt que sur des fractions de rang.

Si la pièce de vigne n'a pas une forme régulière, la longueur des parcelles devra être limitée à celle des rangs les plus courts, de façon à ce que toutes les parcelles aient la même longueur.

Arbres fruitiers : - Les essais sur arbres fruitiers sont très délicats à organiser, à cause de la nécessité de disposer d'arbres très homogènes ( porte-greffe de même clone, greffons prélevés sur un même arbre).

Ils doivent être établis de préférence à la plantation et comporter un minimum de 2 à 4 arbres soumis au contrôle ( pesée) par parcelle, ces arbres étant toujours entourés d'arbres de bordure. Les dimensions des parcelles seront fonction des écartements de plantation.

Si l'on veut faire des essais avec localisation de fumure, il est indispensable d'établir des parcelles allongées comportant un nombre d'arbres plus élevé.

#### B - Fourrières et allées

Lors de l'établissement du plan de l'essai, prévoir les fourrières en fonction des machines utilisées pour les travaux et notamment pour la récolte ( moissonneuse-batteuse, etc...): les fourrières doivent être assez larges pour que les machines manoeuvrent entièrement en dehors des parcelles.

Dans les essais sur prairies, la fourrière sera remplacée par une bande de terrain qui éloignera les parcelles d'essai des clôtures. Ceci évitera notamment le piétinement de l'essai par les visiteurs et, dans les essais sur pâture, celui des animaux qui se tiennent souvent en bordures des clôtures.

Dans l'établissement du plan, il faut également prévoir des allées, au moins entre blocs, pour faciliter les contrôles en cours de végétation.

Dans les essais sur prairie, les allées seront fauchées pour faciliter le passage lors des visites.

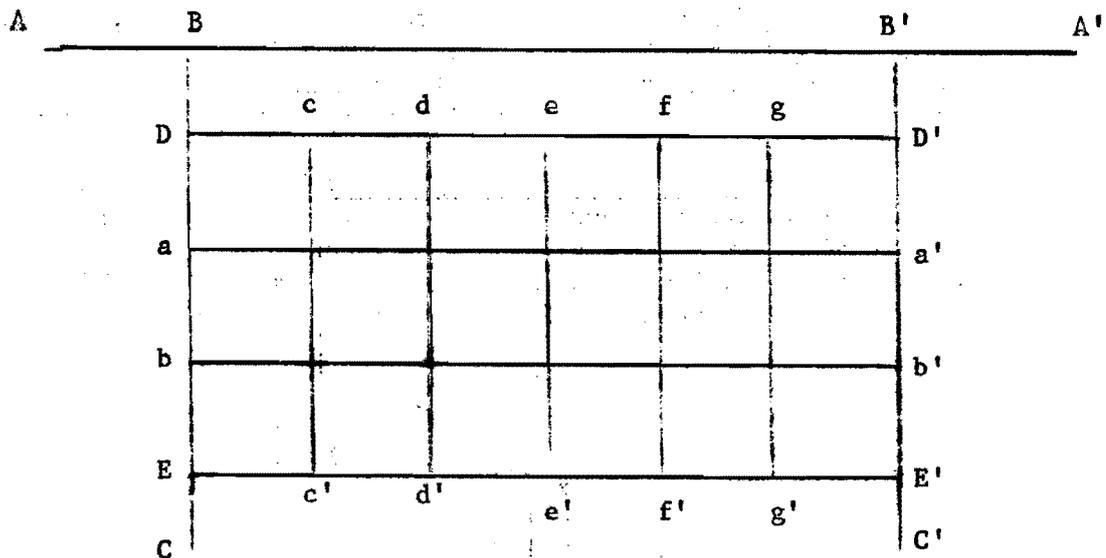
La largeur minimum des allées est de 1 à 2 mètres.

## 2 - IMPLANTATION DE L'ESSAI SUR LE TERRAIN

Prendre si possible comme base de l'essai une ligne de repère existant sur le terrain : fossé, chemin, clôture, etc... Ceci n'est pas toujours possible en raison de la forme du champ.

Dans le cas le plus simple, on procédera comme suit : soit AA' la ligne choisie, par exemple l'un des côtés du champ, A étant un repère fixe. On mesurera la distance AB que l'on reportera sur un plan, puis la distance BB' qui correspond à la longueur d'un des côtés de l'essai. Au moyen de l'équerre d'arpenteur, on jalonne les alignements BC et B'C' perpendiculaires sur AA', puis on mesure sur ces alignements les distances BD = B'D' et DE = D'E'. On marque ensuite les points intermédiaires a, b, c, d, etc... situés à la limite des parcelles ou des blocs. Ces limites pourront être

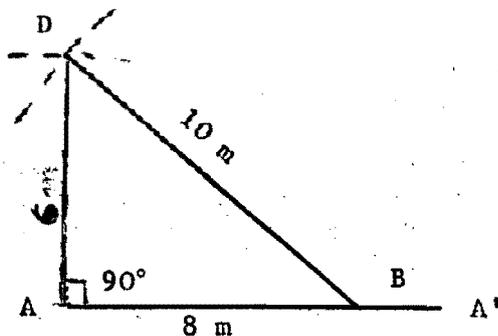
matérialisées sur le terrain en tendant des cordeaux, lors de l'épandage des engrais, par exemple.



Il y a intérêt à noter les distances AB et AD, de manière à pouvoir retrouver le point D, même si l'on n'a pas d'équerre à sa disposition.

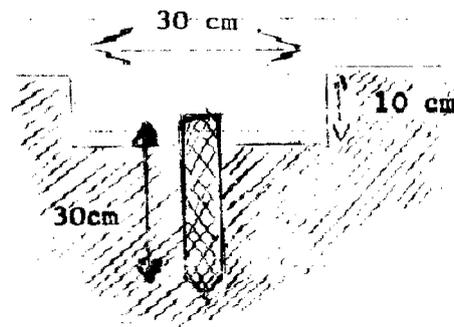
Quand le champ n'a pas une forme régulière permettant de disposer l'essai parallèlement à l'un de ses côtés, il y a intérêt à disposer l'essai sur le papier avant de l'implanter sur le terrain.

Si l'on n'a pas d'équerre pour tracer les perpendiculaires, on peut appliquer la règle du triangle rectangle (carré de l'hypothénuse = somme des carrés des deux autres côtés). Sur le côté du champ AA' on porte une longueur AB = 8 m. En utilisant la chaîne d'arpenteur, on trace d'une part un arc de cercle de centre B et de 10 m de rayon, d'autre part un arc de cercle de centre A et de 6 mètres de rayon. Ces deux arcs de cercle se recoupent en D. AD est perpendiculaire à AB.



Lors de l'implantation d'un champ d'essai, ne jamais oublier de s'éloigner suffisamment des bordures du champ, talus, haies, ligne d'arbres etc.. qui peuvent être une cause d'hétérogénéité (assèchement du terrain par les racines d'arbres, sensible parfois à plus de 10 mètres). Ne pas oublier les fourrières et les allées quand elles ont été prévues.

Cas particulier des prairies : - Il y a toujours intérêt à délimiter les parcelles par de petits piquets qui resteront en permanence sur le terrain. Afin de ne pas gêner les travaux de récolte et d'éviter l'arrachage par les animaux, on utilisera des piquets de 0,30 m de long et de 3 cm de côté environ.



Ces piquets dont l'extrémité sera peinte en blanc seront enfoncés en terre, après avoir " décapé " l'herbe sur un carré de 25 à 30 cm de côté et 10 à 15 cm de profondeur. La tête du piquet dépassera le fond du trou de quelques centimètres et on maintiendra l'intérieur du carré desherbé en utilisant du chlorate de soude.

Au moment des visites, il peut être utile d'adjoindre aux piquets-repères des piquets de grande taille qui dépasseront l'herbe, de manière à bien situer les limites des parcelles.

La délimitation des parcelles sur le terrain ne dispense pas de l'établissement de repères fixes, situés dans les clôtures ou dans les haies.

#### Repères fixes

Une fois l'essai piqueté sur le terrain, reporter sur un plan toutes les dimensions qui ont été mesurées.

Ce premier piquetage est provisoire; il servira au prélèvement d'échantillons de terre, à l'épandage des engrais, etc... Les piquets devront être retirés la plupart du temps pour permettre les travaux culturaux et replacés au moment de la récolte.

Pour retrouver sans erreur les limites des parcelles, il est indispensable d'avoir, en bordure du terrain, des repères fixes : arbres, bornes, etc... Si on utilise les piquets, ceux-ci doivent être fixés en terre de telle sorte qu'on ne puisse pas les enlever. L'expérience montre que, malgré toutes les précautions, ces piquets-repères disparaissent quelquefois.

Afin de retrouver rapidement l'emplacement des piquets-repères on peut creuser un trou à l'endroit choisi et le remplir de ciment ou de béton. Pour éviter que les piquets de bois ne soient cassés ou arrachés, on peut les remplacer par des tubes métalliques de 20 à 30 mm de diamètre et dont la base est sertie par un collier de serrage noyé dans le ciment.

Si l'on désire, au contraire, que les piquets soient amovibles, en bordure de champ par exemple, il suffit d'entourer le pied du tube d'un manchon de papier pendant la prise du ciment. Prévoir un bouchon ou un système de protection pour que les trous ne soient pas comblés par la terre quand on enlève les piquets.

Un tel système serait éventuellement utilisable dans les champs eux-mêmes, à condition d'enterrer la masse de béton un peu en dessous du labour. Les piquets pourraient être enlevés au moment des travaux, puis remis en place.

### Signalisation

Lorsque l'essai doit être visité, disposer sur chaque parcelle une pancarte portant, soit un numéro, soit l'indication de la fumure. Ces indications doivent être claires et bien lisibles.

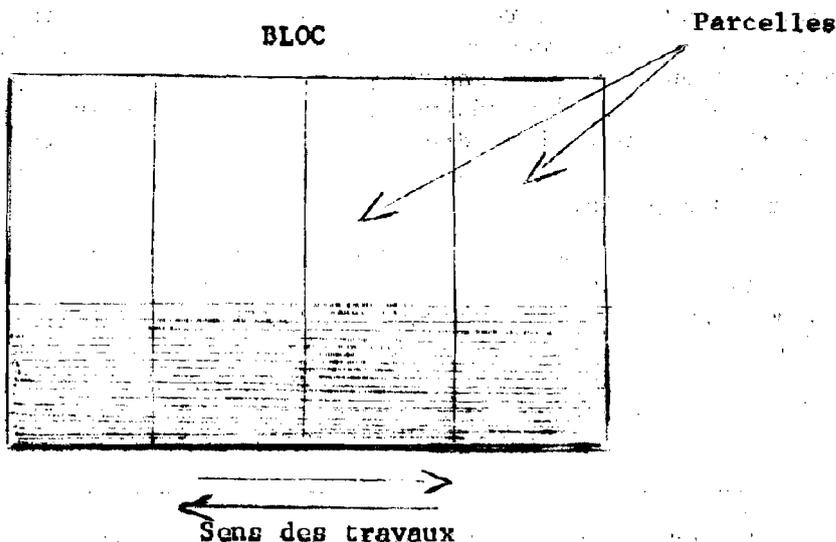
Il peut être utile de placer un plan d'ensemble de l'essai sur un tableau spécial, situé à l'entrée du champ.

## 3 - CONDUITE DES ESSAIS -

D'une façon générale, tous les travaux doivent être effectués le même jour sur toutes les parcelles de l'essai ( carré latin ) ou au moins sur toutes les parcelles d'une même répétition, dans les essais en blocs, pour ne pas créer une éventuelle homogénéité en cas d'arrêt obligatoire du travail ( mauvais temps par exemple ).

### A - Travaux aratoires

Lorsque, dans un bloc, les parcelles sont situées les unes à côté des autres, il y a, de plus, intérêt à effectuer les travaux en travers des parcelles, de manière à ce qu'elles soient toutes affectées par l'arrêt du travail au cas exceptionnel où celui-ci serait rendu nécessaire.



Ne pas changer le réglage des machines au milieu d'un bloc.

Les allées et fourrières seront labourées en même temps que le champ.

Le labour déportant la terre de 25 à 30 cm du côté de la verse, il faudra faire verser la terre dans un sens, puis au labour suivant dans l'autre sens pour éviter le transport d'engrais d'une parcelle sur l'autre. Et lorsque l'épandage des engrais aura lieu avant labour, on tiendra compte de ce déport ( voir ci-dessous : Epandage des engrais ).

Dans le cas de labour en planches, calculer la largeur des planches de manière à ce que les dérayures tombent dans les allées.

## B - Epandage des engrais

L'épandage des engrais est une des opérations les plus importantes dans les essais de fumure. Sauf cas exceptionnel, il doit être exécuté par le technicien chargé de la conduite de l'essai, si possible en présence de l'agriculteur ou de son représentant. Les engrais appliqués à dose uniforme sur tout le champ peuvent, à la rigueur, être épandus au semoir par l'agriculteur, mais toujours en présence du technicien qui doit vérifier les quantités épandues et s'assurer de leur bonne répartition. On proscriera, sur les essais, l'emploi des épandeurs du type " centrifuge " qui risquent de ne pas donner une répartition parfaitement régulière.

Les engrais destinés à chaque parcelle doivent être pesés à l'avance ( après écrasement et tamisage pour les engrais pris en masse ), mis en sacs (1) et étiquetés pour éviter des erreurs de parcelles.

Les sacs seront déposés en tête des parcelles sur lesquelles les engrais doivent être épandus. Il y a intérêt à limiter les parcelles par des cordeaux. Les engrais, divisés en deux lots, seront épandus de préférence en deux fois, suivant deux sens perpendiculaires ou, si les parcelles sont étroites et allongées, en superposant un aller et un retour.

Opérer par temps calme. Si l'on craint le vent, qui sévit surtout pendant la journée, épandre les engrais très tôt le matin ou bien le soir et se baisser pour effectuer l'épandage au voisinage des bordures.

Les engrais très pulvérulents ( scories, etc... ) ou ceux à épandre en petite quantité, peuvent être mélangés à de la terre du champ ou à du sable humide lorsque la terre du champ est trop lourde, la terre utilisée pour le mélange étant prélevée sur la parcelle où l'engrais doit être épandu. L'augmentation du volume à épandre permet d'effectuer l'épandage en deux fois et parfois plus, si l'on désire assurer une meilleure répartition de l'engrais. De toutes façons, il faudra veiller à ce que le mélange terre-engrais ou sable-engrais soit très homogène, ce qui ne peut être obtenu que par des brassages répétés.

On commencera à épandre les engrais sur une bordure de la parcelle en jetant l'engrais toujours vers l'intérieur, jamais vers l'extérieur (risque d'entraînement par le vent dans la parcelle voisine).

On marquera chaque passage par un piquet volant qui servira de repère pour éviter de passer deux fois au même endroit.

---

(1) Les sacs en matière plastique étanches et faciles à laver sont particulièrement recommandés.

Sur les parcelles étroites, lorsque l'épandage des engrais aura lieu avant labour, on décalera le piquetage de la largeur déplacée par le labour ( en moyenne 30 cm) , de façon à ce que l'engrais se retrouve après labour à l'intérieur de la parcelle.

De toutes manières, dans les essais de fumure qui durent plusieurs années, on évitera difficilement l'entraînement d'une partie des engrais sur la parcelle voisine. Cet entraînement se fait obligatoirement par les façons superficielles qui déplacent la terre. Son effet est particulièrement visible sur les plantes de bordure des parcelles à fumure carencée, lorsque des allées d'au moins 2 m ne séparent pas ces dernières des parcelles à fumure complète. C'est pourquoi, lors de la récolte des essais de fumure, il y a toujours intérêt à éliminer les plantes de bordure sur une largeur d'un mètre au moins.

Pour les parcelles de grande surface, on peut être amené à utiliser des épandeurs mécaniques, mais il faut parfaitement les connaître. De toutes manières, il faudra contrôler le réglage au préalable en opérant en dehors de l'essai, mais sur un sol similaire.

Dans les essais d'engrais, il y a toujours intérêt, pour assurer une meilleure répartition, à épandre les engrais simples séparément plutôt qu'en mélange.

Lorsqu'on doit épandre successivement deux engrais dont le mélange est déconseillé ( par exemple risque de dégagement d'ammoniac) on fera suivre le premier épandage d'un coup de herse ou de cultivateur.

Dans les essais en blocs, il est indispensable d'épandre les engrais bloc par bloc, au cas où le travail devrait être interrompu par suite du temps. Ne jamais s'arrêter tant que le bloc n'est pas fini quelles que soient les conditions.

Dans les commandes d'engrais, prévoir 10 % de plus que les besoins pour tenir compte des pertes ou des erreurs possibles en cours de manipulation.

### C - Semis ou plantation

On utilisera toujours sur les champs d'essai des semences ou des plants sélectionnés et uniquement de variétés ayant fait leur preuve dans la région.

Les semis ou plantations devront être effectués en lignes ou en poquets plutôt qu'à la volée et l'on veillera à avoir toujours le même nombre de lignes ou de poquets par parcelle.

Les lignes devront être parallèles aux limites des parcelles de manière à faciliter les observations en cours de végétation et les travaux de récolte.

On assurera ce parallélisme en se guidant au moyen d'un cordeau ou d'un râteau rayonneur. Celui-ci peut être utilisé dans les deux sens

perpendiculaires lorsqu'on effectue des semis ou plantations en poquets ; semences ou plants seront alors disposés sur le terrain aux points de rencontre du quadrillage.

Le rayonneur n'est utilisable qu'en terre bien préparée ( hersée, ou hersée et roulée, selon les sols).

Les semis de céréales seront effectués au semoir, après réglage préalable de celui-ci. Lorsqu'on utilisera des parcelles assez larges, tous les 5 ou 6 mètres on sautera une ligne, en bouchant par exemple une goulotte du semoir, de manière à constituer un passage qui facilitera les épandages d'azote tardifs. Dans ce cas, ne pas oublier de rouvrir la goulotte, en bout de ligne.

Dans les essais avec répétitions, les allées entre parcelles et entre blocs peuvent être obtenues de la même manière ou par destruction des lignes inutiles, après la levée.

Rappelons que les céréales et plus particulièrement les céréales d'hiver doivent être semées à faible profondeur ( 2 à 3 cm) de manière à faciliter une levée régulière, à réduire les risques de gel ( beaucoup plus à craindre lorsque la tige enterrée est longue) et à favoriser le tallage.

Le premier rang des céréales sera disposé à la limite de la parcelle.

Les semis ou plantations de plantes sarclées seront effectués à la machine ou éventuellement à la main, lorsqu'il s'agit de repiquage. Disposer le rang de bordure un peu en retrait de la limite de la parcelle ( 25 cm pour les pommes de terre et les betteraves, 40 à 50 cm pour les choux), de manière à réduire l'empiètement des plantes sur les allées.

Dans les essais sur plantes sarclées, éviter de planter les allées.

Les semis de prairies temporaires et de prairies artificielles seront toujours effectués de préférence en terre nue, plutôt que dans une céréale. Leur réussite sera ainsi beaucoup mieux assurée.

Comme tous les autres travaux qui ont une influence sur la végétation et par conséquent sur les rendements, semis ou plantations doivent être effectués dans la même journée sur toutes les parcelles de l'essai, ou du moins, par bloc.

#### D - Traitements phytosanitaires et herbicides

Tous les traitements qui concourent à l'obtention de cultures saines et bienvenues :

- Traitement du sol ( contre taupins, etc...)
- Traitement des semences
- Traitement des cultures ( mauvaises herbes, maladies, insectes et, dans certains cas, gelées).
- etc...

devront être effectués de manière aussi régulière que possible, pour éviter de provoquer des vides ou des irrégularités de végétation.

Pour traiter le sol contre les insectes, on prendra les mêmes précautions que pour les épandages d'engrais. Ex. : insecticide mélangé préalablement à de la terre du champ ou à du sable, pour augmenter le volume et réduire les poussières, et épandage en deux passages croisés pour assurer une meilleure répartition.

Les traitements herbicides devront être effectués à bonne époque, tant pour les cultures que pour les mauvaises herbes, compte tenu des produits utilisés. Dans certains cas, un épandage complémentaire d'azote pourra être nécessaire pour faciliter la reprise de la végétation.

#### E - Travaux d'entretien

Ces travaux doivent être effectués sur les champs d'essai avec plus de soin que sur une culture ordinaire. Comme pour les travaux préparatoires, épandage d'engrais et semailles, on effectuera les travaux dans une même journée, au moins sur toutes les parcelles d'un même bloc.

Les allées et fourrières doivent être nettoyées au moins 4 ou 5 fois dans l'année. Il est nécessaire de préciser au début de l'expérimentation si cet entretien incombe au cultivateur ou au technicien chargé de la surveillance de l'essai.

Lorsque celui-ci dispose d'un motoculteur, l'entretien des allées avec la fraise permet de prolonger de 10 à 15 jours l'effet du nettoyage par rapport à un sarclage ordinaire. Par contre, il laisse un terrain creux où l'on enfonce en marchant (inconvenient au moment des visites) : on y remédiera par un ou deux passages de rouleau.

Lorsqu'il est utile d'avoir un espace libre pour réunir les visiteurs, par exemple autour du panneau où sont affichés plan et renseignements relatifs au champ d'essai, on aura intérêt à semer un gazon sur cet emplacement pour ne pas piétiner dans la boue, en cas de mauvais temps.

Dans les essais sur prairie, lorsqu'on a prévu une allée fauchée autour des parcelles pour faciliter les visites, il peut être utile de disposer un fil de fer à 30 cm du sol, à la limite des parcelles, pour éviter le piétinement des bordures.

#### F - Surveillance et observation en cours de végétation

Les champs d'essai doivent être l'objet d'une surveillance fréquente pendant toute la période de végétation, de manière à s'assurer que tous les travaux, épandage d'engrais et traitements sont effectués en temps voulu.

Le technicien chargé de la conduite de l'essai doit être présent, même s'il n'y participe pas manuellement, lors de tous les travaux importants (épandage d'engrais, plantation, récolte).

A l'occasion de ces visites, il sera possible au technicien de noter des différences fugaces. De telles observations peuvent contribuer à expliquer les écarts constatés ultérieurement dans les rendements.

Cotations en cours de végétation : - Il est extrêmement utile de chiffrer par des cotations les différences observées en cours de végétation. On peut procéder en donnant à chaque parcelle une note de 0 à 10 ou de 0 à 20, pour traduire la hauteur des tiges ou le développement de la végétation, l'importance du tallage, l'intensité de coloration du feuillage, la proportion des plantes épiées ou fleuries, l'importance de la vesse, etc. et, à l'approche de la maturité, le rendement estimé.

Dans les essais sur prairies, on notera de cette manière la hauteur de l'herbe et sa densité, en tenant compte de l'importance relative des légumineuses qui donnent un " pied d'herbe " plus ou moins fourni.

Pour atténuer les erreurs et supprimer l'influence du coefficient personnel, il y a intérêt à faire effectuer cette cotation par plusieurs personnes, en choisissant des observateurs qualifiés, et à prendre la moyenne des diverses cotations.

Dans les essais comportant un grand nombre de parcelles, il est commode de distribuer aux visiteurs avertis des feuilles préparées à l'avance, sur lesquelles figure le plan du champ et où il n'y aura plus qu'à porter les notes attribuées à chaque parcelle. Le plan ne devra pas porter d'indication de fumure pour ne pas influencer la notation.

Indépendamment des renseignements qu'elles fournissent les cotations effectuées en cours de végétation ont le grand avantage d'obliger à une observation minutieuse du champ, alors que bien souvent, on se contenterait d'un coup d'oeil superficiel.

Les cotations, comme toutes les observations consignées, sur les champs d'essai, doivent être datées et signées. Elles peuvent être renouvelées aux principales époques de la végétation.

#### Analyse de la flore des prairies

L'analyse de la flore permet de suivre l'évolution des prairies sous l'effet des engrais. Elle peut être qualitative (détermination des espèces dominantes) ou quantitative (évaluation de la part qui revient aux différentes espèces dans la composition de la prairie). Pour être exact, il faudrait pouvoir déterminer le poids respectif des différentes espèces au moment de la récolte. Ce dernier contrôle est très difficile car il nécessite un prélèvement d'échantillons pris au hasard et triés à la main, opération longue et fastidieuse même lorsqu'on se contente de séparer les plantes en trois groupes : graminées, légumineuses et plantes diverses; Un tel contrôle ne peut se faire que dans des stations d'essais spécialisées.

On se contente le plus souvent d'évaluer la fréquence de chaque espèce sur pieds. Cette estimation n'est possible que lorsque l'herbe n'est pas trop développée. Voici deux méthodes qui peuvent être utilisées :

- Méthode de l'anneau : Un anneau de gros fil de fer, de 5 à 7 cm de diamètre, est jeté au hasard dans la prairie. On note chaque fois le nom des espèces présentes dans la surface ainsi délimitée.

Sur un peuplement homogène et pour les parcelles de 4 ares, 30 sondages donnent des résultats d'une précision correcte (1). Lorsque la prairie est hétérogène ou sur de grandes parcelles, le nombre de jets doit être plus important.

Bien entendu cette méthode n'est applicable que lorsque l'herbe est rase. Elle nécessite une parfaite connaissance des plantes de prairie au stade " herbacé ".

- Méthode visuelle : On dénombre, en plusieurs points de la prairie ( 5 à 6 environ), le nombre de plantes rencontrées dans un cercle de 5 à 10 mètres de diamètre et on apprécie le volume occupé par chacune d'elles.

Le dénombrement des plantes, qui est plus exactement le dénombrement des touffes de chaque plante, n'offre pas de difficulté.

L'appréciation du volume occupé par chaque touffe est plus délicate ; cependant, avec un peu d'habitude, on arrive facilement à le déterminer. Pour ce faire, on affecte les touffes d'un coefficient qui varie de 1 à 5 et qui est à peu près constant pour chaque espèce.

Voici quelques coefficients, à titre d'exemple :

- Graminées de petit tallage ( flouve, crételle, brize).....1
- Touffes plus volumineuses (dactyle, fétuque, brôme) ... 2 ou 3
- Touffes étalées sur une grande surface atteignant parfois plus d'un mètre carré ( trèfle, violet, trèfle blanc, vesces)..... 3 à 5

Le pourcentage s'exprime en tenant compte du volume relatif occupé par chaque espèce, comme l'indique le tableau ci-dessous :

Espèces	Nombre de touffes	Volume d'une touffe	%
N° 1	$T_1$	$V_1$	$\frac{T_1 \times V_1}{\sum (T \times V)} \times 100$
N° 2	$T_2$	$V_2$	.....
...	.....	.....	.....
N°n ..	$T_n$	$V_n$	$\frac{T_n \times V_n}{\sum (T \times V)} \times 100$

( 1) Sur un hectare, le nombre des sondages doit être de 50 à 60, en utilisant un anneau de 6 cm de diamètre.

Pour atténuer l'influence de l'estimation individuelle, on peut procéder à plusieurs et faire la moyenne des observations ou, si l'on opère seul, revenir sur la même prairie à quelques jours d'intervalle.

Bien que les méthodes indiquées ne soient pas très précises, le contrôle de la flore complète utilement les indications fournies par les rendements.

#### 4 - RECOLTE -

La récolte est une opération essentielle. Suivant la manière dont elle est effectuée, les rendements seront connus avec plus ou moins de précision et, de cette précision même, dépendent les conclusions que l'on peut tirer de l'essai.

Pour évaluer les rendements, on peut soit récolter les parcelles entières après élimination des plantes de bordure, soit opérer par prélèvement partiel. Les deux méthodes conduisent à des résultats satisfaisants moyennant certaines précautions qui sont indiquées ci-dessous.

##### A - Céréales et plantes à graines

Récolte à la moissonneuse-batteuse : - C'est la manière la plus pratique d'opérer mais, en général, on omet de peser les pailles. Celles-ci pourraient souvent être récoltées au " pick up ".

Il est indispensable d'utiliser une moissonneuse-batteuse à coupe frontale avec laquelle on effectue un ou deux passages à pleine coupe dans chaque parcelle.

Avant de commencer la récolte de l'essai proprement dit, on fera un passage de machine hors essai, pour remplir les trémies, puis, avant d'entamer l'essai, on fera tourner la machine à vide pendant une durée fixe ( par exemple 1 à 2 minutes). Au sortir de chaque parcelle, on fera de même, pendant la même durée. Il restera ainsi, à peu de chose près, la même quantité de grains dans les trémies.

Lorsqu'on veut éliminer une bordure en début et en fin de parcelle, il est préférable de faire cette élimination au préalable.

Dans le cas du colza, on opérera comme pour les céréales, en veillant à ce que toutes les parcelles soient au même degré de maturité pour éviter des différences dues à un égrenage irrégulier. Cela peut obliger à échelonner la récolte. C'est pourquoi l'expérimentation sur colza est assez délicate.

Récolte à la lieuse - Lorsqu'on récolte à la lieuse, il est préférable de récolter par parcelle entière. Si, en bout de parcelle, la dernière gerbe n'est pas complète, on déclanche le lieur à la main pour ne pas mélanger la récolte de deux parcelles.

La pesée des gerbes aura lieu avant le battage et l'on évaluera le poids de la paille par différence entre le poids des gerbes et celui du grain.

Renseignements complémentaires : Il est indispensable de mesurer le poids spécifique, ou, à la rigueur, le poids de 1 000 grains.

Pour le blé dur, évaluer le pourcentage de grains mitadinés et, pour le riz, le pourcentage de grains verts et éventuellement la qualité du grain après usinage.

#### B - Maïs

Sauf cas exceptionnel, la récolte des essais de maïs doit s'effectuer à la main. Nous avons précédemment indiqué qu'elle devait porter sur 100 à 200 pieds, après élimination des bordures (1).

On pèsera en vert la récolte de chaque parcelle, les épis étant dépouillés de leurs spathes, puis on calculera l'humidité par une des méthodes suivantes :

- Sécher la totalité de la récolte en épis ou en grains, et prendre, après séchage, un échantillon de grains de chaque parcelle, pour en déterminer l'humidité. Calculer le rendement en grains ramené à un taux uniforme d'humidité (15%) (2).

- Sécher seulement une partie de la récolte en procédant comme suit : diviser la récolte de chaque parcelle en lots de 5 épis aussi semblables que possible en forme et en longueur. Prendre ensuite un épi de chaque lot. Ce cinquième de la récolte sera alors séché et traité comme dans le cas précédent.

#### C - Plantes sarclées

La remarque ci-dessus, relative au peuplement (note 1), s'applique à la récolte de toutes les plantes sarclées.

- Pommes de terre : Si possible, récolter d'abord les bordures pour les éliminer puis les pieds contrôlés, c'est-à-dire 100 à 200 pieds par parcelle.

Il y a intérêt à peser séparément les tubercules commercialisables et la grenaille, la proportion de grenaille pouvant varier suivant la fumure.

(1) - Il est indispensable de récolter une surface identique sur toutes les parcelles de l'essai. On comptera le nombre de pieds récoltés par parcelle. En cas de différences importantes de peuplement, si ces différences n'étaient pas liées aux traitements il serait préférable d'utiliser la méthode dite de la covariance pour interpréter les résultats. Cette méthode qui demande des calculs assez longs n'est pas exposée dans cette brochure.

(2) - Si G représente le poids de grains au taux d'humidité H, le poids de grains secs, à 15 % d'humidité, s'obtiendra au moyen de la formule :

$$P : \frac{100 - H}{85} \times G.$$

- Betteraves : Peser 100 à 200 betteraves par parcelle, après élimination des bordures.

En cas de récolte à la machine, on peut opérer sur un plus grand nombre de pieds.

Les betteraves seront pesées avec la terre qui adhère, la tare à éduire étant obtenue par lavage ou grattage effectué sur la totalité du lot ou sur un échantillon moyen.

Les betteraves destinées aux mesures de densité ( 6 à 10 par parcelle) ne devront pas être lavées mais grattées.

- Plantes diverses : Dans les essais sur cultures maraîchères, le contrôle doit porter au minimum sur 100 plantes. Ces cultures nécessitent souvent des récoltes échelonnées qui sont à prévoir lors de l'organisation de l'essai.

#### D - Prairies

Dans les expériences sur prairies, évaluer les rendements annuels totaux et ne pas se contenter d'une seule coupe, en raison de la très grande influence de chaque coupe sur la pousse suivante.

a) Prairies de fauche : La plupart des agriculteurs récoltent trop tard. On se basera sur le début de la floraison pour déterminer la date de la première coupe. Les coupes suivantes seront faites quand la repous se aura atteint une certaine hauteur. Si toutes les parcelles ne sont pas au même stade de végétation, il faut soit les récolter séparément, soit se baser sur les premières parcelles bonnes à couper, pour récolter simultanément toutes les parcelles de l'essai.

Sur les prairies permanentes, dont la flore est le plus souvent hétérogène, procéder à la coupe lorsque les graminées prédominantes commencent à fleurir.

- Evaluation des rendements : Suivant les dimensions des parcelles et le personnel dont on dispose, on peut effectuer la récolte par parcelle entière ou par prélèvements partiels.

Il est indispensable d'effectuer la pesée en vert et de prélever aussitôt un échantillon d'herbe de 2 à 4 kg que l'on fera sécher pour évaluer le foin sec. Ce prélèvement doit être effectué aussitôt la pesée de la récolte en vert, de manière à ce que l'échantillon ait le même taux d'humidité que le reste de la récolte. Le procédé qui consiste à évaluer le foin sec en divisant le rendement en vert par un coefficient arbitraire est absolument à proscrire.

En cas de prélèvement partiel, on utilisera de préférence une moto-faucheuse à coupe frontale qui permettra de connaître exactement la surface coupée, au minimum le dixième de la superficie des parcelles.

A défaut de moto-faucheuse, on pourra utiliser un cadre de 4 à 6 m<sup>2</sup> avec lequel on effectuera plusieurs prélèvements par parcelle.

#### b) Pâtures :

Le contrôle des essais sur pâture nécessite des prélèvements analogues à ceux effectués sur prairies de fauche, pour estimer l'herbe consommée par les animaux. Les échantillons d'herbe à faire sécher pour évaluer la matière sèche seront ici moins importants (1 à 1,5 kg).

Les prélèvements doivent être effectués avant et après passage des animaux, pour pouvoir estimer les refus.

Dans les essais sur pâture, les parcelles soumises à différents traitements doivent être pâturées simultanément par des lots d'animaux assez importants pour que le pâturage s'effectue en deux ou trois jours.

Dans les essais en blocs qui comportent plusieurs répétitions, il faudra faire pâturer simultanément toutes les parcelles d'un même bloc.

En fait, les essais sur pâture sont très difficiles à conduire et ne peuvent qu'exceptionnellement être réalisés en dehors des stations expérimentales qui disposent d'un personnel spécialisé et de troupeaux homogènes.

#### E - Vignes

On pèsera séparément la récolte de chaque parcelle en éliminant les rangs de bordure, c'est-à-dire au minimum deux rangs de chaque côté de la parcelle. Le contrôle portera sur une centaine de pieds.

En plus des rendements, on déterminera le degré mustimétrique.

Préciser le nombre de souches sur lesquelles a porté la récolte et la densité de plantation à l'hectare. Il serait, dans certains cas, intéressant de vinifier séparément les récoltes des différentes parcelles pour juger par dégustation de la qualité des vins obtenus.

#### F - Arbres fruitiers

Lorsque les essais sur arbres fruitiers comportent un petit nombre d'arbres par parcelle (cas des essais à répétitions), il est très utile de connaître non seulement le rendement par parcelle mais par arbre, spécialement lorsque l'essai a été entrepris plusieurs années après la plantation. Certaines mesures effectuées avant la mise en place de l'essai (circonférence des troncs à hauteur fixe) permettent de tenir compte des différences individuelles et de ramener par un calcul, (covariance) les rendements à ce qu'ils seraient si les arbres étaient de même taille.

Lorsqu'on veut apprécier les différences de grosseur ou de coloration des fruits, il est indispensable d'échantillonner la récolte pour faire porter les mesures sur une fraction seulement des fruits récoltés.

Prélever au hasard un certain nombre de fruits dans chaque caisse de récolte ou, mieux, récolter au hasard un certain nombre de fruits sur chaque arbre, en opérant toujours dans un secteur de même orientation par rapport à l'axe Nord-Sud (fruits soumis à la même luminosité) et à une hauteur similaire, par exemple dans le tiers central de l'arbre en hauteur.

#### 5 - PRELEVEMENTS d'ECHANTILLONS DE PLANTES POUR ANALYSE

L'analyse des plantes prélevées en cours de végétation ou à la récolte permet de déterminer les éléments fertilisants absorbés par les cultures aux différents stades de la végétation ou exportés par les récoltes.

Les exportations sont indispensables à connaître pour pouvoir établir des bilans de fumure.

Certaines techniques, comme le diagnostic foliaire, servent aussi à suivre l'alimentation des plantes et à vérifier si les éléments fertilisants apportés ont bien été utilisés.

Il est nécessaire d'effectuer l'échantillonnage des récoltes avec beaucoup de soin, car la qualité des échantillons conditionne la valeur des chiffres fournis par le laboratoire d'analyse.

On opérera de manière différente suivant la nature des cultures.

#### A - Echantillons de récolte

##### Céréales et plantes à graines :

##### Récolte à la moissonneuse-batteuse

Prélever 1 kg de grain par parcelle aussitôt la pesée qui aura permis d'évaluer le rendement. Procéder de même pour la paille lorsqu'il aura été possible d'évaluer le rendement parcellaire.

##### Récolte à la lieuse

Au moment de la récolte ou mieux lors du battage, constituer pour chaque parcelle un bottillon d'au moins 2 kg, en réunissant environ 10 poignées de plantes entières (tiges + grains) prélevées en différents points de la parcelle ou sur différentes gerbes.

Peser l'échantillon en même temps que la récolte (même taux d'humidité) et mettre aussitôt en sac, avec double étiquette, l'une à l'intérieur, l'autre à l'extérieur du sac en mentionnant :

1° - le poids de l'échantillon

2°- le rendement à l'hectare ( paille + grains) de la parcelle,

3°- le rendement en grains après battage.

Pour les plantes à graines autres que les céréales ( colza, haricots, féveroles), lorsque les tiges ou fanes ne sont pas enfouies, prélever un échantillon d'un kg de celles-ci pour analyse, s'il a été possible de déterminer la quantité de fanes produites à l'hectare.

### Plantes sarclées

#### Pommes de terre

Constituer un échantillon de 4 kg de tubercules, par des prélèvements effectués, en différents points de la parcelle ; opérer au moment de la récolte et aussitôt après la pesée qui aura permis d'évaluer le rendement.

#### Betteraves à sucre

Prélever un échantillon de 10 betteraves par parcelle et en déterminer le poids net après grattage, immédiatement après la pesée qui aura permis d'évaluer le rendement. Découper sur toute la longueur de la betterave un secteur de 3 cm d'épaisseur, du côté extérieur de la racine. Les 10 secteurs réunis constitueront l'échantillon moyen, destiné à l'analyse. Peser, mettre en sac plastique fermé après adjonction d'un produit conservateur ( formol..) et expédier aussitôt au laboratoire d'analyse.

Pour les collets, constituer un échantillon en réunissant 5 collets de betteraves par parcelle, les peser et mettre en sac plastique fermé avec un produit conservateur pour l'expédition.

#### Betteraves fourragères et Choux fourragers

S'il s'agit de betteraves fourragères, opérer comme pour les betteraves à sucre ou, après passage des plantes au hachoir, prélever 2 à 4 kg de cossettes. Celles-ci seront expédiées dans des sacs en matière plastique fermés, avec produit conservateur.

Pour les choux fourragers, prendre 10 plantes entières par échantillon. Hâcher assez menu et prélever 2 à 4kg de cossettes qui seront expédiées comme les betteraves.

#### Fourrages verts

Aussitôt la pesée qui aura permis d'évaluer le rendement en vert, prélever une dizaine de poignées d'herbe qui constitueront un échantillon de 2 à 4 kg. Faire sécher à l'ombre avant l'envoi au laboratoire.

Eviter toute perte de matière entre la pesée de l'échantillon en vert et l'envoi au laboratoire.

## B - Diagnostic foliaire

### Pommes de terre

Sur au moins 20 % des pieds récoltés de chaque parcelle, prélever les deux feuilles de la base portées par une tige provenant directement du tubercule-mère. Chaque échantillon comportera au moins 100 feuilles. Effectuer les prélèvements à la floraison ou à une époque similaire, en principe en juillet. Choisir de préférence des feuilles intactes. En raison de la proximité du sol, ces feuilles sont souvent souillées : les laver soigneusement pour enlever la terre et éliminer en même temps les produits de traitement. Mettre ensuite à sécher en évitant le développement des moisissures.

Lorsqu'on aura prévu des prélèvements de feuilles pour analyse sur pommes de terre, on évitera d'employer des produits de traitement renfermant de la chaux ou de l'acide phosphorique.

### Céréales

Au début de la floraison ( sortie des premières étamines) prélever les 2ème et 3ème feuilles sous l'épi sur 60 à 80 tiges prises d'une hauteur moyenne par rapport à l'ensemble de la parcelle. Récolter le limbe, sans la gaine, et ne prélever que des feuilles saines et entières.

Faire sécher à l'ombre en évitant tout risque de moisissure.

### Maïs

Sur au moins 10 % des pieds de chaque parcelle, prélever la feuille située à l'aisselle de l'épi principal, au moment de l'apparition de l'inflorescence mâle. Chaque échantillon doit comporter un minimum de 50 feuilles. Faire sécher à l'ombre.

### Vigne

Prélever, aux 4 époques suivantes :

- début floraison,
- fin floraison ( 8 à 15 jours après le début de la floraison)
- début véraison,
- maturité,

les deux premières feuilles normales situées à la base d'un rameau fructifère, à deux grappes au moins, sur des pieds pris au hasard, à l'exclusion des bordures et des pieds très différents de la moyenne de la parcelle. L'échantillon doit être de 200 grammes de matière fraîche ( environ 40 feuilles qu'on fera sécher à l'air en évitant tout accident de fermentation).

### Arbres fruitiers

Constituer, pour chaque parcelle, un échantillon de 100 feuilles prélevées sur le tiers médian des pousses de l'année. Faire ce prélèvement de préférence dans la première quinzaine de juillet.

### **6 - PHOTOGRAPHIES DE CHAMPS D'ESSAI**

Les photographies en noir et blanc et surtout en couleurs complètent utilement les observations faites en cours de végétation et les résultats chiffrés fournis par les essais.

La photographie en couleurs est pratiquement indispensable pour faire ressortir les symptômes de carence en éléments fertilisants et les différences de teintes de feuillage qui apparaissent sous l'influence des fumures.

Nous insisterons seulement sur quelques points de technique qui faciliteront la réussite des clichés pris sur les champs d'essai.

#### Cadrage

Supprimer du cadre tout ce qui n'est pas essentiel pour obtenir des photographies intéressantes.

Le cadrage est particulièrement important dans la photographie en couleurs, car la totalité du cliché est visible à la projection. Dans la photographie en noir et blanc le cadrage peut être corrigé lors de l'agrandissement sur papier.

Les vues générales exigent un cadrage particulièrement soigné et, dans le cas des champs d'essai, gagnent souvent à être prises d'un point surélevé.

Les " plans moyens " ( prises de vue à une distance de 2 à 5 mètres) isoleront une parcelle ou feront ressortir des différences à la limite de deux parcelles contiguës.

A cette catégorie, appartiennent également les photographies représentant les scènes de travaux agricoles qui gagnent toujours à être prises de près.

Les " gros plans " ( au voisinage de 1 m) font ressortir les détails et accrochent plus encore l'attention que les plans moyens. Ils sont particulièrement faciles à réussir avec les appareils photographiques de petit format ( 24 x 36 ) en raison de la profondeur de champ des objectifs.

#### Précautions pratiques

Lorsqu'on prendra une série de clichés destinés à être mis en comparaison, par exemple les différentes parcelles d'un même essai, on veillera à prendre tous les clichés à la même distance, en mesurant, ne serait-ce qu'au pied, la distance qui sépare l'appareil photographique du sujet photographié.

Pour donner une échelle de grandeur, on disposera un objet ou un personnage situé toujours à la même distance de l'appareil.

Les indications écrites ( pancartes désignant les parcelles d'essai) devront être assez grandes et parfaitement lisibles.

En raison du vent qui agite les plantes, il est rarement possible d'utiliser un temps de pose supérieur au 1/50ème de seconde. Ceci permettra de tenir l'appareil à la main et facilitera la recherche du meilleur cadrage.

Veiller à la mise au point pour les vues rapprochées en raison de la profondeur de champ réduite aux faibles distances.

Dans les photographies de gros plans, approcher le posemètre du sujet pour qu'il soit influencé par la lumière réfléchie, par le sujet lui-même et non par la lumière ambiante.

#### 7 - MATERIEL NECESSAIRE A L'EXPERIMENTATION AU CHAMP

##### Prélèvement d'échantillons de terre

- Sonde légère pour sol et sous-sol superficiel, en terre meuble.
- Sonde hélicoïdale lourde pouvant descendre à 1 mètre et plus (avec rallonge) pour sol compact et sous-sol profond.
- Sonde pour prairies ( de 5 à 15 cm de profondeur)
- Sacs pour échantillons de terre
- Etiquettes.

##### Piquetage du champ

- Equerre d'arpenteur
- Chaîne d'arpenteur ou ruban
- Jalons de géomètre pour les visées.
- Piquets d'angle. Roseaux ou bambous de 1 mètre pour piquetage provisoire.
- Piquets ou poteaux repères à placer dans les bordures pour retrouver la base du champ.
- Cordeaux.

##### Récolte

- Cadre de 4 à 6 m<sup>2</sup> pour prélèvements
- Trépied support de balance et balance romaine de force 100 kg ou bascule pouvant peser 100 kg
- Filet, toile ou sac pour peser la récolte
- Balance d'une force de 10 à 15 kg pour peser les échantillons à faire sécher ou analyser.
- Sacs en matière plastique pour échantillons de plantes.
- Etiquettes
- Matériel nécessaire pour séchage des échantillons récoltés en vert ( caissettes à fond grillagé, filets...)

3<sup>ème</sup> - P A R T I E :

F E R T I L I S A T I O N A Z O T E E

CHAPITRE I - AZOTE et PLANTE

II- AZOTE et SOL

III- BILAN de l'AZOTE

IV- ENGRAIS AZOTES

### III° PARTIE - FERTILISATIONS AZOTEES

#### CHAPITRE I - AZOTE et PLANTE

##### I - ABSORPTION de l'AZOTE

##### A - Absorption de $\text{NH}_4^+$ ou de $\text{NO}_3^-$

L'alimentation azotée des plantes s'effectue par les racines et ceci principalement à partir des ions nitriques ( $\text{NO}_3^-$ ) et ammoniacaux ( $\text{NH}_4^+$ ) existant dans la solution du sol, cependant les nitrites et certains composés organiques azotés, notamment les acides aminés et certaines amides dont l'urée, peuvent être également absorbés directement, mais il s'agit là d'un mécanisme de faible importance agronomique étant donné le caractère transitoire de ces composés.

Les études de physiologie végétale permettant la comparaison des deux formes  $\text{NH}_4^+$  et  $\text{NO}_3^-$  ont été très délicates en raison de la facilité de nitrification de l'ammonium. Cependant, les plantes diffèrent génétiquement dans leur attitude à utiliser l'ion ammonium : celles dont les racines ont une forte capacité d'échange absorbent plus facilement l'ammonium retenu dans le sol sous forme échangeable. De même l'absorption de N sous forme ammoniacale et sous forme nitrique varie suivant l'âge des plantes et des conditions de milieu. En général, quelle que soit la forme de l'apport, la production de matière sèche reste la même à pH 6. Dans les sols neutres ou calcaires, les plantes absorbent généralement la plus grande partie de leur azote sous forme de nitrates mais si le métabolisme est normal, elles contiennent des quantités de nitrates relativement faibles.

##### B - Régularisation de l'absorption

1- Plantes absorbant l'azote gazeux : La régulation est assurée par les bactéries fixatrices travaillant en symbiose avec le végétal.

2- Plantes n'utilisant pas l'azote gazeux : Nous verrons plus loin qu'il existe un équilibre entre la minéralisation (transformation, par des micro-organismes, de N organique en N minéral) et la réorganisation (transformation par des micro-organismes, de N minéral en N organique) ; cet équilibre, qui limite la minéralisation, constitue donc une régulation de la fourniture d'azote aux plantes. Deux autres formes de régulation existent : il s'agit d'une part de la fixation des ions ammonium par le complexe absorbant et d'autre part du lessivage des ions  $\text{NO}_3^-$ .

## II - MÉTABOLISME DE L'AZOTE DANS LA PLANTE

### A - Mécanismes :

Schématiquement, l'ion ammonium s'unit aux acides cétoniques pour former des acides aminés dont l'assemblage constitue les protéines :

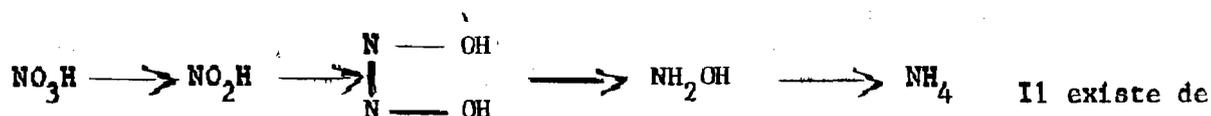


Acide cétonique

acide aminé

Une certaine luminosité est nécessaire à la synthèse des protéines, un éclairage insuffisant peut aboutir à une accumulation d'azote soluble dans les tissus conducteurs de la plante ; pour certaines cultures (soja, sarrasin), une longueur de jour inférieure à 7 heures ne permet plus la formation de protéines.

L'azote est absorbé par les plants sous forme ammoniacale ou sous forme nitrique ; dans ce dernier cas, les nitrates sont réduits par différents systèmes enzymatiques dans lesquels le molybdène joue un rôle important



nombreuses possibilités de réaction pour la réduction des nitrates et la synthèse d'acides aminés ; la réduction ne se poursuit pas toujours jusqu'au stade ultime ; par exemple en présence d'acides cétoniques, l'hydroxylamine réagit directement pour donner des acides aminés.

### B - Conséquences du métabolisme :

L'alimentation ammoniacale ou nitrique interviennent par leurs métabolismes différents sur le pH du milieu.

1- Sur l'acidité du milieu : Lorsque les nitrates sont réduits dans les feuilles, une certaine quantité d'anions "acides organiques" est distraite du métabolisme pour assurer la balance électrostatique avec les cations se trouvant libérés après par la réduction de  $\text{NO}_3^-$ . La quantité d'acides organiques présente dans les vacuoles des cellules foliaires représente donc un témoin de la quantité de nitrates réduits dans les feuilles.

2- Sur la teneur en ions : Si le métabolisme de  $\text{NO}_3^-$  s'effectue dans les feuilles, il nécessite un déplacement considérable des cations minéraux et plus particulièrement de  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$ . En effet, la migration de plusieurs

molécules de nitrates nécessite une plus grande quantité de cations que la migration d'une molécule d'acides aminés ou de protéines.

3- Applications agronomiques : Si nous prenons l'exemple de deux plantes caractéristiques : tomates où la réduction des nitrates s'effectue dans les feuilles, maïs où la réduction des nitrates s'effectue dans les racines, on constate les faits suivants : en nutrition ammoniacale, les feuilles de maïs et tomates sont pauvres en cations ; en nutrition nitrique, pour un même régime d'absorption de  $\text{NO}_3$ , la tomate absorbera une plus grande quantité de cations et surtout de Ca. Ce phénomène peut s'étendre à toutes les espèces neutrophiles, qui sont en même temps nitratophiles.

### III - BESOINS EN AZOTE

#### A - Besoins des principales cultures :

Ceux-ci correspondent globalement aux quantités suivantes :

CULTURES		Rendement en quint <sup>x</sup>	Kg.d'azote par qt brut	Besoin total en kg/ha
Blé .....	grain	45	1,8	81
	total		3,0	135
Orge .....	grain	45	1,6	78
	paille		2,5	112
Escourgeon, avoine .....	grain	40	1,8	72
	total		2,5	100
Maïs .....	grain	50	1,4	70
	total		2,5	125
Betteraves .....	racines	450	0,19	85
	total		0,50	225
Betteraves, fourragères .....	racines	800	0,12	96
	total		0,20	160
Pommes de terre .....	tubercules	35	0,34	120
	total		0,43	152
Colza .....	grain	30	4,0	120
	total		6,0	180
Lin .....		70	2,0	140
Luzerne de 2 ans .....		450	1,2	540
Trèfle violet 1 an .....		300	1,0	300
Fourrage : .....		50	1,6	80
Pâturage permanente .....		260	0,7	182
Pâturage temporaire .....		600	0,5	300

## B - Période critique :

On constate que la plante prélève la plus grande partie de son azote pendant sa phase de croissance active : ~~et cette période est courte~~ il s'agit d'une période critique pour l'alimentation en azote comme pour l'alimentation en eau. A titre d'exemple, chez le blé 60 à 80 % de l'azote sont absorbés entre le tallage et la floraison ; chez le maïs la plus grande partie de l'azote est absorbée dans les quinze jours qui précèdent et dans les 15 jours qui suivent l'apparition des inflorescences mâles. Le synchronisme entre disponibilité et exigence est un des aspects de l'adaptation du végétal au milieu. Les variétés améliorées, permettant d'atteindre des rendements élevés, ont en général des exigences accrues tant sur le plan quantitatif que sur celui de la précision des dates de fourniture.

## C - Carences en azote :

La carence en azote se traduit par une chlorose accompagnée d'une pigmentation pourpre et violacée sur le bord des feuilles (formation d'anthocyanes au lieu de chlorophylle). Ces plantes sont chétives, grêles entraînant à une maturité accélérée avec chute précoce des feuilles et diminution des rendements.

## D - Inconvénients d'un excès d'azote :

- 1 . Retard de maturité
- 2 . Sensibilité plus grande aux maladies
- 3 . Verse

### a) Définition

La verse se manifeste par l'abandon de la position verticale des tiges ; cet accident n'affecte jamais un pied unique mais souvent une partie étendue de la surface cultivée. La verse se produit surtout après une pluie violente, mais n'atteint que très rarement les bordures qui semblent pourtant les plus exposées au vent.

### b) Différents types de verses

Nous mentionnerons pour mémoire la verse parasitaire, due à un champignon (*Cercospora herpotrichoides*) produisant un type de verse aisément reconnaissable, car ce phénomène se produit en cercles autour des foyers d'infection. Les verses mécaniques correspondent à plusieurs processus :

- Verse racinaire se produisant généralement lorsque la montaison est déjà avancée. Elle se rencontre surtout sur des sols ayant une certaine fluidité après les pluies. Une forte poussée de vent sur une chaume ne subissant plus la courbure entraîne le déracinement et la plante se couche de tout son long. Si la croissance n'est pas terminée, la partie supérieure se redressera au niveau d'un noeud.
- Verse caulinaire (la plus fréquente) : elle se produit dès le début de la montaison lorsque les jeunes herbacées sont encore sans vigueur. Le point le plus fragile se situe dans le bas de l'entre-noeud qui, à cette phase de développement est encore peu solide bien que soutenu par la gaine de la feuille. Si une inclinaison brutale survient (rafale de vent) il y a déformation du cylindre de la tige et verse.

- Verse nodale : sur des pieds de céréales normalement dressés, le géotropisme cesse parfois d'agir et les derniers entrenœuds forment un angle plus ou moins net avec les entrenœuds précédents.

### c) Causes de la verse

L'azote provoque un allongement des premiers entrenœuds (les plus bas) et la lignification se réduit dans la tige et dans les racines (MULDER 1954). Le manque de résistance de la base de la tige pourrait provenir d'une importante migration des glucides au moment du stade laiteux des grains (PALMER 1953). En fait, la cause déterminante de la verse correspond à un déséquilibre entre les glucides solubles et les protides de la plante ; cet équilibre varie pour les diverses parties de la plante en fonction de l'époque de végétation. Pendant la période de croissance, l'azote pénètre rapidement alors que les capacités de photosynthèse sont encore limitées : à l'opposé l'équilibre de la fructification est dominé par les glucides. Si l'azote disponible dans le sol s'y rencontre ordinairement en dessous des taux optima et n'atteint que rarement la dose toxique, l'entrée du carbone dans la plante dépend de l'éclairement. Le rapport glucides sur protides (G/N) varie donc en fonction des deux facteurs azote et insolation ; une céréale jaunissant à trop de glucides ou manque d'azote. Il suffit donc parfois de quelques beaux jours pour ébranler l'équilibre et faire jaunir la plante. Si l'azote abonde, avec une photosynthèse très active, tout va bien, mais si par suite d'un temps pluvieux, la photosynthèse diminue, le rapport glucides/azote peut laisser apparaître un déficit en glucides. En reprenant les différents types de verse les causes précédentes s'appliquent à chacun.

Verse racinaire : L'ancrage racinaire dépend évidemment du patrimoine héréditaire mais plus encore du rapport glucides/azote. En cas de manque d'azote, les glucides peuvent s'accumuler dans les tissus jusqu'au point de devenir toxiques, mais cette réserve est utilisée préférentiellement par les racines et l'ancrage de la plante s'améliore.

Verse Quilinaire : De nombreux facteurs interviennent, mais ils se rapportent tous plus ou moins à un trop faible rapport glucides/azote. En effet, la tige sera solide si les entrenœuds du bas ne s'allongent pas exagérément, se renforcent assez vite et, d'autre part, si la partie supérieure de la tige n'est pas trop développée. Or le manque de soleil ou l'abondance d'azote contribuent à l'allongement des entrenœuds du bas, au prolongement de leur jeunesse et également à une privation de glucides qui leur permettraient de se renforcer. Parallèlement, les gaines protectrices voient leur importance diminuer au profit des limbes devenus dangereux en raison de leur poids.

Verse nodale : Cette courbure, qui atteint les derniers entrenœuds supérieurs, est également liée en partie au rapport G/N entraînant une intoxication avec perturbation des métabolismes.

### d) Conséquences pratiques :

Le déséquilibre G/N peut se manifester de deux façons :

- Après un hiver pluvieux, si les céréales croissent sur des sols lessivés, il arrive que des champs entiers jaunissent par manque d'azote (ils ont trop de soleil par rapport à

l'azote dont ils disposent) ; le seul recours consiste à augmenter la dose d'azote.

- A l'inverse, si le blé a beaucoup d'azote à sa disposition, il a besoin de soleil pour équilibrer cette abondance. L'ombre lui sera néfaste car elle réduira tous les éléments de soutien ( chaumes et gaines) en développant les tiges. En revanche, tout ce qui diminue l'ombre tend à empêcher la verse ( semis clair, tallage moyen ).

Le problème pratique consiste à obtenir le maximum de rendement avec le minimum de risques de verse. La solution serait facile si l'on pouvait prévoir l'ensoleillement. Au point de vue génétique, dans les régions à faible ensoleillement, des variétés à port dressé s'imposent. Les variétés les plus intéressantes correspondent à des plantes à métabolisme très actif permettant de limiter les aléas dus à une insolation défailante.

La verse peut être évitée grâce à l'emploi du c.c.c. ( Chlorure de Chlorocholine), régulateur de croissance, qui raccourcit les entre-noeuds et augmente aussi la résistance de la plante. Le coût de ce produit et son efficacité limitée restreint son emploi pour des actions de "sécurité" ou de "sauvetage", lorsque la dose d'azote est excessive ou mal répartie.

## CHAPITRE II - AZOTE ET SOL

## I - DIFFERENTES FORMES D'AZOTE DANS LE SOL -

L'azote se trouve dans le sol sous trois formes :

A - Forme gazeuse :

L'azote élémentaire à l'état gazeux peut être un des composants de l'air ou le résultat de la dénitrification.

B - Forme organique :

Les molécules organiques renfermant de l'azote sont innombrables et l'azote correspond à un des éléments fondamentaux de la matière organique du sol ( cf. cours d'agrobiologie).

C - Forme minérale :

Dans les sols agricoles, l'azote minéral se trouve sous forme nitrique et forme ammoniacale ; si elles coexistent, la forme nitrique demeure normalement la plus abondante surtout en surface.

1 - Forme ammoniacalea) L'ion  $\text{NH}_4^+$ 

Le cation  $\text{NH}_4^+$  provient généralement, soit de la minéralisation de la matière organique, soit d'un apport sous forme d'engrais minéraux. On manque encore de données sur la répartition de  $\text{NH}_4^+$  en particulier dans les sous-sols. Dans le sol, cet ion se trouve surtout à l'état absorbé par les colloïdes argileux et humides ; à ce titre, il est soumis aux lois d'échanges des cations ; il est donc relativement immobile et n'est pas soumis au lessivage. L'ion  $\text{NH}_4^+$  a le même comportement que l'ion  $\text{K}^+$  vis-à-vis du complexe absorbant du sol et la fixation de l'ammonium se fait d'autant plus mal qu'il y a saturation du complexe en potassium. D'autre part, on sait que l'ammonium est susceptible de se fixer provisoirement dans le réseau cristallin des minéraux argileux et qu'un équilibre existe entre l'ammonium extérieur absorbé et l'ammonium intérieur fixé entre les feuilles d'argile.

En général la prédominance de la forme ammoniacale est associée à des caractéristiques agronomiques indésirables ; dans la couche arable des sols agricoles on peut chiffrer l'azote ammoniacal à une quantité variant de 0 à 50 kg/hectare.

L'ion ammonium intervient directement dans la nutrition des plantes, mais il semble que certaines plantes soient plus aptes que d'autres à provoquer la sortie des ions  $\text{NH}_4^+$  fixés à l'intérieur du feuillet d'argile ; cette propriété est probablement en liaison avec la capacité d'échange des racines. Dans le cas d'une mauvaise minéralisation ( sols podzoliques ou sols sous climats septentrionaux) l'ion ammonium correspondra à la forme la plus utilisée par les végétaux.

### b) - Ammonification :

Les substances protéiques végétales du sol contiennent un grand nombre d'acides aminés et sont soumises à une dégradation par de nombreuses espèces de la microflore ; les bactéries peuvent provoquer la libération d'ammoniaque par désamination au cours de différentes réactions provoquées par des enzymes. L'ammonification, à un moment donné, est influencée par l'humidité, la température, les caractères généraux de la matière organique du sol, l'état des flores microbiennes ; ces dernières sont notamment sensibles au pédo-climat de la période qui précède immédiatement celle où les observations sont effectuées. Une ammonification brutale peut donner lieu à des pertes d'azote sous forme gazeuse dans certaines conditions ( sols alcalins, sols sableux). L'étude d'une dynamique de l'ammonification n'est donc que la mesure d'une résultante. On doit retenir en particulier que la présence de matières organiques à rapport carbone/azote élevé ( paille, chaumes) , en favorisant la protéogénèse, diminue le rendement apparent de l'ammonification.

En résumé, la forme ammoniacale est une forme soluble, retenue par le complexe absorbant du sol, mais essentiellement transitoire si les conditions de transformation sont favorables.

## 2 - Forme nitrique

### a) L'ion nitrique :

L'anion  $\text{NO}_3^-$  n'était pas retenu par le pouvoir absorbant des sols, il en résulte une très grande mobilité. Généralement  $\text{NO}_3^-$  est associé à des cations ; le cation prédominant étant  $\text{Ca}^{++}$  ; dans les solutions du sol il existe évidemment une ionisation complète. L'ion nitrique peut se rencontrer à des concentrations allant de 40 à 300 kg/ha dans les horizons supérieurs du sol.

### b) Nitrification :

Seul  $\text{NH}_4^+$  échangeable peut faire l'objet de cette oxydation ; l'ammonium fixé sous forme non échangeable doit d'abord passer sous forme échangeable pour être transformé en nitrates. Au cours de la nitrification il existe deux phases ( cf. cours de microbiologie du sol).

#### - Nitritation

Les ferments nitreux appartiennent à plusieurs genres, les nitrosomonas sont les plus importants. Ce sont des autotrophes, ne se nourrissant pas de matière organique préformée, mais essentiellement de matière minérale. Ils transforment  $\text{NH}_4^+$  en  $\text{NO}_2^-$ . Cette réaction d'oxydation libère l'énergie qui leur est nécessaire.

#### - Nitratation

Les ferments nitriques sont surtout représentés par les nitrobacters. Ils transforment  $\text{NO}_2^-$  en  $\text{NO}_3^-$  avec une libération d'énergie inférieure à celle de la 2<sup>e</sup> de la 3<sup>e</sup> réaction précédente.

Les nitrificateurs sont des aérobies stricts. Ils utilisent le carbone du gaz carbonique et des carbonates et n'ont pas de besoins en carbone organique. Le tableau suivant montre que les ferments nitreux sont encore plus sensibles que les ferments nitriques à une baisse de la teneur en oxygène.

		Teneur en oxygène				
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{12}$	$\frac{1}{20}$
Diminution des valeurs de la respiration	Ferments nitreux	80 %	57 %	34 %	20 %	
	Ferments nitriques	95 %	68 %	45 %	30 %	16 %

### c) Dénitrification

C'est un phénomène essentiellement d'origine biologique provoquant la perte d'une bonne partie de l'azote nitrique et empêchant son utilisation par les végétaux. Les nitrates sont réduits dans le sol en composés dont beaucoup se dégagent dans l'atmosphère en particulier de l'oxyde nitreux  $\text{NO}_2$  et surtout de l'azote  $\text{N}_2$  ; ce processus correspond à la dénitrification au sens strict. Une partie de l'azote cependant reste dans le sol sous forme de nitrites et d'ions ammonium, ces corps étant récupérables par la végétation ; il s'agit d'un phénomène de dénitrification au sens large.

#### Conditions de la dénitrification :

Elle a lieu en anaérobiose, mais une faible teneur en oxygène paraît activer cette dénitrification ; le processus exige également une température élevée ( 27 à 30°C), un pH compris entre 7 et 8,2 et un sol riche en matières organiques assimilables.

#### La dénitrification : processus biologique :

Les agents de la dénitrification sont des microorganismes dits dénitrifiants, essentiellement des bactéries.

#### a) Dénitrifiants hétérotrophes :

La dégradation des substances organiques produit de l'hydrogène qui se fixe sur l'oxygène issu de la réduction des nitrates. Les produits azotés qui résultent de cette réduction sont : des nitrites  $\text{NO}_2^-$  ; de l'oxyde nitreux  $\text{NO}_2$  ; de l'hydroxylamine  $\text{NH}_2\text{OH}$  ; de l'azote gazeux  $\text{N}_2$ , de l'ammoniaque  $\text{NH}_3$ . La plupart des dénitrifiants appartiennent à cette catégorie ; ce sont surtout des *Pseudomonas*, des *Achromobacter*, des *Nitrococcus*.

### b) Dénitrifiantes autotrophes :

Une substance minérale est oxydée par l'oxygène du  $\text{NO}_3^-$ . L'énergie libérée par l'oxydation sert à transformer le carbone minéral en carbone organique. Suivant que la substance minérale oxydée correspond à du soufre, de l'hydrogène ou un sel ferreux, il s'agit respectivement de sulfobactériales, d'hydrogénobactériales ou de ferrobactériales.

### Importance pratique de la dénitrification :

Dans les sols bien constitués, elle est négligeable. Dans certaines conditions de milieu elle prend une grande importance, la perte en azote pouvant atteindre 120 kg/ha/an, ce qui représente à peu près tout l'azote nécessaire à la croissance et au développement annuel de la couverture végétale. La dénitrification est surtout accusée lorsque le sol est riche en matière organique, chaud, et presque saturé en eau ou recouvert d'une pellicule vernissée, conditions déterminant une anaérobiose ménagée.

Elle devient très intense lors des pluies prolongées d'été ou d'automne. Aussi, l'agriculteur doit-il suivre de près l'évolution des conditions météorologiques et faire figurer, s'il y a lieu, les pertes par dénitrification dans le bilan de l'azote.

Des façons culturales appropriées, en augmentant l'aération du sol, limitent la dénitrification.

## II - ETUDE DE LA MINERALISATION

### A - Généralités :

Ce n'est pas un paradoxe d'énoncer qu'un agriculteur cultivant un sol pauvre en humus demeure davantage maître du contrôle de la végétation que s'il est amené à suivre les caprices de la minéralisation des réserves organiques du sol ; aussi nous essayerons d'approfondir ce problème complexe de la libération d'azote minéral à partir de matière organique fraîche ou stabilisée.

### B - Dosage des formes d'azote minéral :

Le dosage de  $\text{NO}_3^-$  se fait après simple percolation d'un sol avec l'eau et détermination quantitative des nitrates dans la solution obtenue. Le dosage de  $\text{NH}_4^+$  s'effectue après échange des cations avec  $\text{CaCl}_2$  (cf. T.P.) A noter qu'il existe d'autres méthodes de détermination de l'azote minéral du sol ( cellule de Conway, microdiffusion....)

### C - Taux de minéralisation :

Celui-ci est défini par DROUINEAU (1953) comme le rapport entre l'azote minéralisable de la terre en place sur l'azote total. Dans un sol agricole ce taux croît avec la richesse en matière organique ; ainsi, à titre d'exemple pour un même sol mais avec des parcelles différemment fumées, les taux de minéralisation sont les suivants :

	N TOTAL	TAUX DE MINERALISATION
Témoin . . . . .	1,24	2,5
Fumier de ferme . . . . . ( dose normale )	1,45	3
Fumier de ferme . . . . . ( dose double )	1,78	3,5
Fumier de Mouton : . . : . . . . ( dose double )	2,63	4,4

#### D - Mesure de l'aptitude à la minéralisation en laboratoire :

Cette mesure ne peut être faite au laboratoire qu'avec certaines réserves ; elle ne peut être envisagée que pour des sols de bonne structure dans lesquels la minéralisation n'est pas entravée par le manque d'aération dans les conditions naturelles. On cherche à mesurer les possibilités de libération d'azote ammoniacal et d'azote nitrique dans les meilleures conditions de température, d'humidité et d'aération : 50 g de terre humidifiée aux 2/3 de la capacité maximum de rétention sont laissés 1 mois à l'étuve à 28°. La somme azote nitrique et ammoniacal est déterminée avant et après l'incubation. La différence entre les deux dosages, corrigé par de l'ammonium fixe, correspond à l'azote minéralisable.

Ce test, cependant, ne présente qu'une valeur relative : il permet de se rendre compte de l'abondance et de la qualité des réserves organiques azotées et de l'état de la flore microbienne. En fait, il exprime la résultante de deux activités toujours parallèles:

- Production d'azote minéral { ammonification }  
{ nitrification }
- Utilisation de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et NH<sub>4</sub><sup>+</sup> pour la synthèse des protides des micro-organismes.

Aussi si, sous nos climats, la date de prélèvement de l'échantillon n'entre pas en ligne de compte pour un dosage d'azote total, pour l'azote minéralisable on préfère effectuer les prélèvements à la fin de l'hiver. Malgré ces imprécisions cette méthode a été commercialisée aux U.S.A. et dans les sols bien cultivés, il existe une bonne corrélation entre la minéralisation à l'étuve et la production de l'azote minéral in situ.

#### E - Facteurs intervenant sur la vitesse de la minéralisation :

1- Nature du sol : Les sols argilo-calcaires présentent une matière organique dont la dégradation (K<sub>2</sub>) demeure assez faible ; ce fait peut s'expliquer en raison de plusieurs facteurs :

- Présence de fraction azotée organique inerte, protégée par un revêtement calcaire ;
- Importance du pH intervenant directement en favorisant la fixation non symbiotique de l'azote surtout en régions chaudes ;
- Adsorption des protéines sur les argiles augmentant avec le pH. Le calcium sert de pont entre l'argile et les molécules organiques ( cf. cours d'Agrologie). Ces protéines mélangées à de la montmorillonite et à de l'illite deviennent résistantes à l'attaque microbienne.

Généralement, le rapport C/N des sols agricoles se maintient au voisinage de 10, même si la teneur en azote s'abaisse à 0,2 % avec une exception pour les sols calcaires où l'on peut descendre à 6.

## 2 - Profondeur et limite de la pénétration des racines.

Plus l'exploration du sol par les racines est développée, plus la matière organique sera répartie dans le profil, donc la minéralisation plus facile.

## 3 - Taux des réserves d'azote organique

Le coefficient  $K_2$  varie en fonction de la teneur du sol en humus ( cf. cours d'Agrologie). Un taux élevé de matière organique indique généralement une mauvaise minéralisation ( sol insuffisamment aéré, faible activité des micro-organismes). Pour un sol donné, la vitesse de minéralisation décroît lorsque décroît le stock de matière organique. A titre d'exemple une expérience réalisée sur prairie au Kansas, après 30 ans de défrichage, indique les pertes suivantes :

$K_2 = 1 \%$  pour une richesse initiale de 2,3 %

$K_2 = 0,74 \%$  pour une richesse initiale de 1,84 %

$K_2 = 0,40 \%$  pour une richesse initiale de 1,23 %

Rapide au cours de la première décade, la chute de la teneur en N s'atténue et devient faible après 30 ans, époque à laquelle l'équilibre n'est pas encore atteint.

## 4 - L'aération :

Une bonne aération est favorable à la minéralisation.

## 5 - Le pH

Les valeurs optima pour la minéralisation se situent entre 6,9 et 7,5.

## 6 - Conditions climatiques

Enfin l'évolution de l'azote minéral est surtout soumise aux conditions climatiques et l'on peut distinguer deux grandes zones.

Zone méditerranéenne ( voir graphique ci-contre )

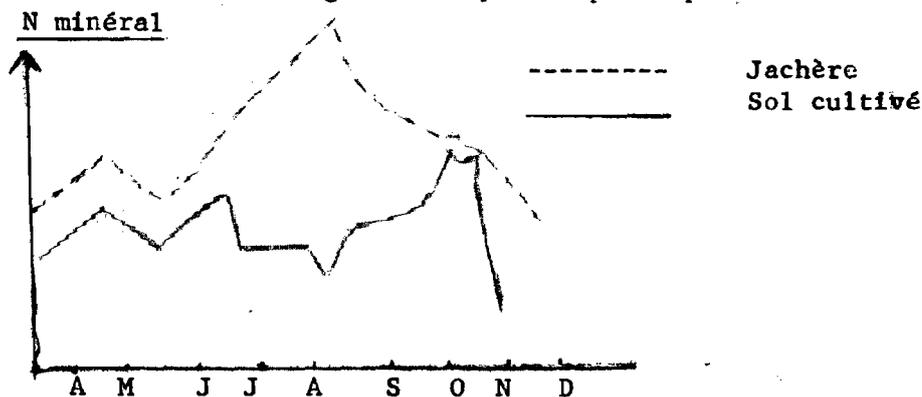
Caractérisée par des étés secs et chauds et des pluies abondantes en hiver et au printemps, la quantité d'azote minéral ( $\text{NO}_3 + \text{NH}_4$ )

reste très faible dans la couche arable pendant tout l'hiver et au début du printemps. Elle s'élève ensuite plus ou moins tôt et plus ou moins régulièrement suivant les pluies de printemps pour atteindre son maximum en août-septembre. Ce maximum peut correspondre à plus de 100 kg d'azote/hect. et il croît avec les quantités d'azote organique apportées. L'accumulation d'azote minéral ne vient pas des remontées des nitrates mais d'une minéralisation in situ. Les premières pluies de fin d'été commencent à faire décroître la teneur en azote minéral qui diminue ensuite brutalement avec celles d'octobre et novembre. Dès le mois de décembre, les teneurs deviennent insignifiantes.

### Zone atlantique

Les célèbres graphiques de ROTHAMSED, publiés en 1915 donnent une idée sur l'évolution de l'azote nitrique dans un sol cultivé ou dans un sol nu.

On remarque deux maxima sur le sol en culture, l'un au printemps, l'autre à l'automne. Par contre, dans le sol en jachère, la teneur en nitrate augmente au printemps et présente son maximum en été.



### **III - MIGRATION DE L'AZOTE MINERAL**

Ces migrations affectent surtout l'azote nitrique, car  $\text{NH}_4^+$  étant fixé par le complexe absorbant est beaucoup moins sujet au lessivage. L'amplitude des migrations dépend de plusieurs facteurs :

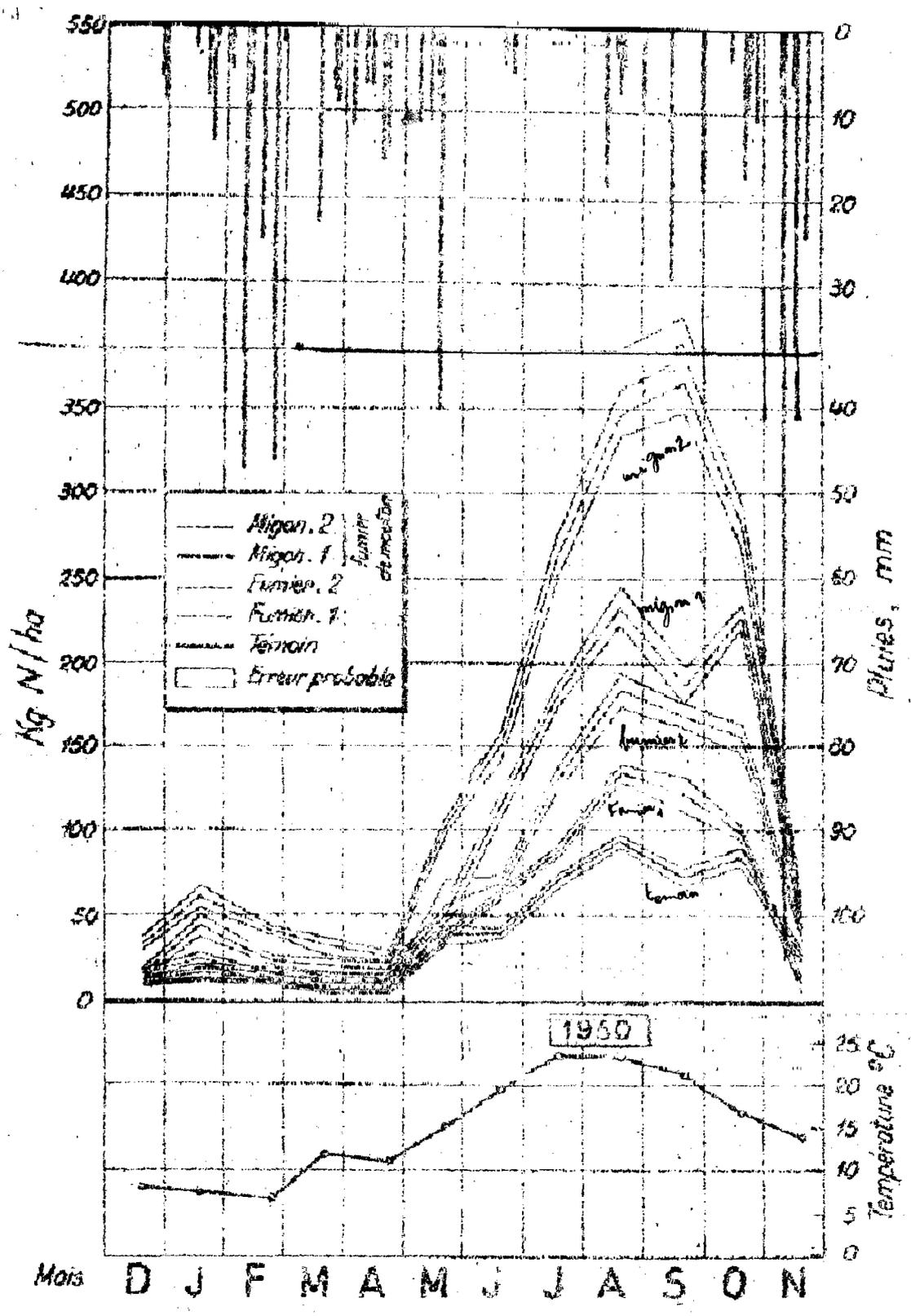
#### A - Sol :

##### 1 - Texture - Exemple :

Pour les sols limoneux de la région toulousaine, le déplacement vertical est de 1 cm pour 3 cm de pluie infiltrée (Soubies et Al 1952). En sol calcaire (crayeux) à partir du moment où le sol est à sa capacité maximum de rétention en eau chaque cm d'eau tombée entraîne les nitrates sur 5 mm (Hébert, 1961).

##### 2 - Structure -

##### 3 - Capacité de rétention



Courbes des variations saisonnières de l'azote minéral dans un sol calcaire. Grasse 1950 (d'après G. Drouineau et S. Lalevée Annales Agr. 1951, p. 1.12)

## B - Climat

### 1 - Eau infiltrée -

La vitesse de descente de la nappe de nitrates est liée à la quantité de pluie infiltrée. Le rapport de l'eau infiltrée aux précipitations varie <sup>non</sup> seulement suivant la topographie, le type de sol, son état structural, la couverture végétale, mais encore suivant la durée de la précipitation et suivant les conditions climatiques au moment de celle-ci. Certaines chutes de pluies d'été et d'automne ne comptent guère dans un total mensuel pour la migration des nitrates. Enfin, le gel du sol est un facteur d'imperméabilité à prendre en considération.

Au cours de l'hiver, l'approvisionnement en azote minéral de la couche arable reste très faible car l'amonification et la nitrification présentent peu d'activité et la nappe de nitrates se situe plus ou moins profondément dans le sol à la suite des pluies d'automne. Les nitrates peuvent soit se trouver encore à la disposition des racines, soit être sortis de la couche exploitée par la plante.

Pour déterminer cette migration, on suit les nitrates au cours de leur descente dans tout le profil en multipliant les prélèvements et en prenant les garanties statistiques indispensables et l'on observe une migration groupée sous formes d'ondes.

Le graphique ci-contre établi d'après les travaux de Soubies et Al de l'ONIA montre clairement que cette migration suit exactement l'intensité des précipitations.

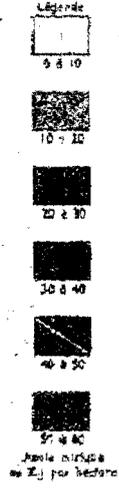
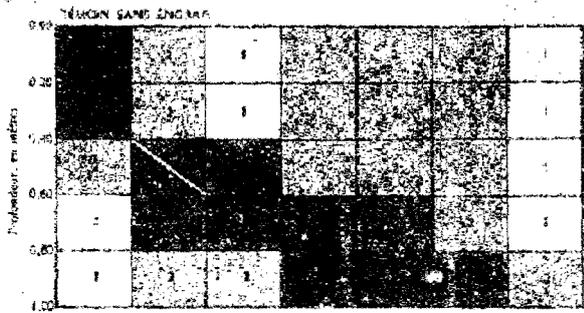
Il est également possible d'étudier les migrations de l'azote minéral dans des cases lysimétriques: On mesure la quantité d'eau drainée et la composition de celle-ci, notamment sa teneur en nitrates; malheureusement ces installations très coûteuses d'établissement et de fonctionnement ne sont pas fréquentes.

En résumé ces migrations sont plus faciles à observer dans des climats très tranchés comme le climat méditerranéen et se produisent de façon moins marquée dans le Bassin Parisien. Néanmoins on doit les prendre en considération surtout dans les terres peu profondes et peu fertiles, car si, après un automne doux et pluvieux, l'hiver est très humide, on assiste à un lessivage avec épuisement de l'azote organique et, au printemps, on rencontrera très peu de nitrates en surface. Cependant, il existerait dans tous les cas une teneur minimum et non nulle en azote nitrique, teneur entretenue par une minéralisation de l'azote à partir de réserves faiblement dégradables par les micro-organismes.

De toutes façons l'importance des données pluviométriques est telle que chaque expérience sur la minéralisation n'est valable qu'avec une étude parallèle sur la valeur des précipitations à l'endroit considéré.

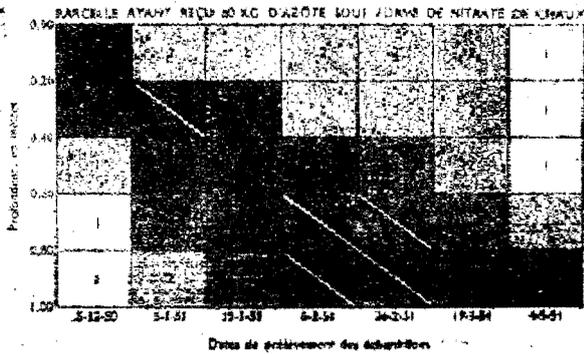
### 2 - Chaleur et sécheresse

L'accumulation d'azote minéral dans la couche arable de sols nus au cours de l'été, est liée à l'existence d'une saison chaude et sèche. Celle-ci est une des caractéristiques des climats méditerranéens. Elle peut se présenter également, certaines années, dans le Sud-Ouest, dans la région parisienne et en Alsace. La courbe des variations saisonnières de l'azote



Ce graphique a été dressé au moyen de chiffres publiés par Sohier, Guet et Maury, de l'ONIA. Des dosages périodiques des nitrates, dans et à l'écart des tranches de l'épaisseur de sol, ont permis d'observer l'immigration en profondeur de ces éléments fertilisants. En tous les lieux où plusieurs fois encore les doses des pré-ventives.

On remarque l'effacement progressif de la zone la plus riche en nitrates.



Date de prélèvement des échantillons

minéral, représentée surtout par celles des nitrates, donne alors un maximum très marqué au cours des étés secs.. Cette accumulation est particulièrement nette en saison sèche dans les sols en jachère nue travaillée (DROUINEAU 1951)

S'il existe une nappe phréatique peu profonde, reliée à la surface par des éléments fins, les nitrates peuvent remonter vers la surface et s'y accumuler au cours de l'évaporation. De même, les nitrates peuvent se déplacer latéralement et s'accumuler sur le sommet des buttes (cultures en billons).

Dans le cas où il n'y a pas de nappe phréatique dans le sous-sol, on constate également un phénomène de migration par ascensum : l'accumulation des nitrates provenant du sol ou d'un apport d'engrais se localise dans les tout premiers centimètres du profil dans une zone qui tend à se dessécher. L'ascension des nitrates se réalise d'autant plus vite et d'autant plus complètement qu'ils se trouvent plus rapprochés de la surface au début de la période sèche. Dans les régions méridionales, cette migration peut, en quelques jours, appauvrir considérablement la zone de sub-surface, entre 5 et 15 centimètres de profondeur, zone initialement la plus riche en azote nitrique et où les racines s'alimentent.

En conclusion : Comme la réhumectation et le lessivage dus aux pluies d'automne semblent provoquer une chute des teneurs en azote minéral, il serait intéressant de connaître pour chaque type de région culturale les reliquats présents dans le sol à une époque déterminée et les probabilités de minéralisation ; sans être rigoureuse, cette méthode éviterait de se livrer aux caprices du hasard.

#### IV - PHENOMENE DE REORGANISATION OU PROTEIDOGENESE.

Ce phénomène consiste en une transformation d'azote nitrique en azote organique et s'effectue généralement sans perte d'azote gazeux. Le processus est aisé à observer lors d'applications d'engrais sous forme nitrique et ammoniacale ; très souvent et très rapidement, on constate une diminution très nette et pouvant atteindre plus de 50 % de l'apport initial et ceci sans ou avec une faible chute de pluie excluant toute possibilité de lessivage. L'azote minéral se reconvertit en azote organique. Cette protéidogénèse microbienne est un facteur d'équilibre ; en effet, si elle peut diminuer momentanément l'azote minéral mis à la disposition des récoltes, elle affaiblit par contre les pertes d'azote nitrique par drainage.

Cette réorganisation intervient, suivant les climats, surtout dans les sols riches en matières organiques peu humifiées. L'ordre de grandeur de son effet peut être estimé à quelques dizaines de Kgs/ha et affecterait aussi bien l'azote nitrique que l'azote ammoniacal.

Pour un sol donné, il existe un rapport  $\frac{C}{N}$  (  $\frac{C \text{ fermentescible}}{N \text{ minéral}}$  )

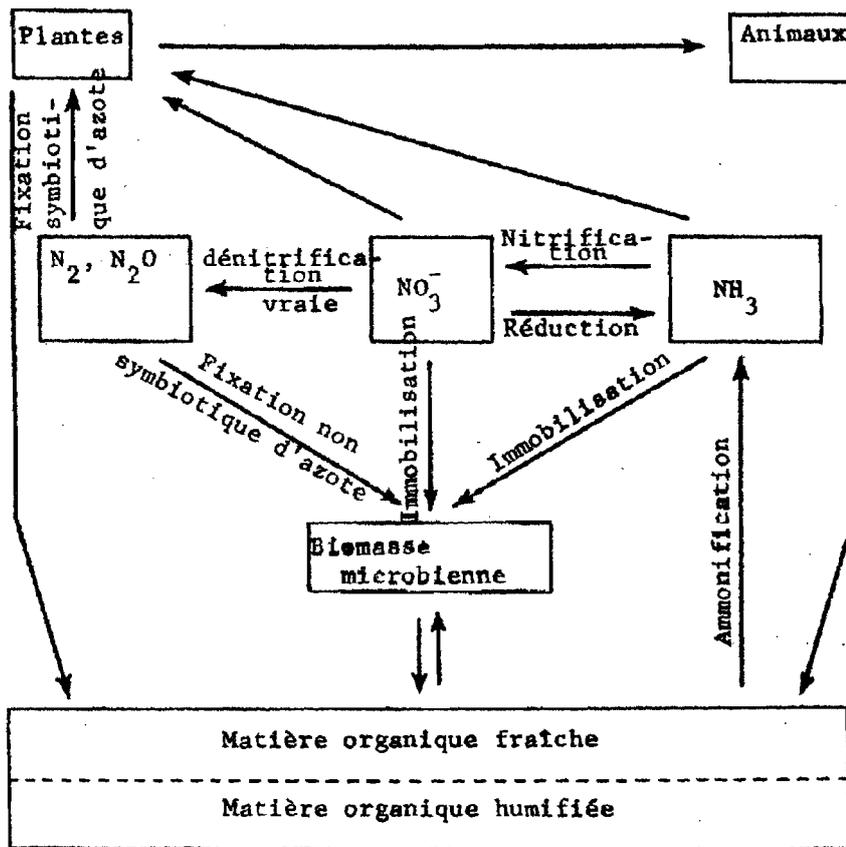
à peu près constant. Toute modification de l'un des termes de ce rapport entraîne immédiatement le déclenchement d'une activité microbienne qui tend à ramener le rapport à sa valeur initiale. Inversement un excès d'azote minéral semble déclencher une activité microbienne temporaire, qui réduira le taux de cet azote minéral.

CHAPITRE XII - BILAN de l'AZOTE dans UN SOL

**1 - CYCLES de l'AZOTE**

L'utilisation du terme cycle implique une interdépendance étroite entre les différentes transformations, or cette interdépendance est souvent très lâche ; nous empruntons donc à l'excellent ouvrage d'écologie microbienne de DOMMERCUES et MANGENOT (1970), d'une part un schéma résumant les transformations biologiques de l'azote dans les sols, d'autre part, l'ensemble des transformations cycliques.

INFLUENCE DE LA MICROFLORE SUR LE MILIEU

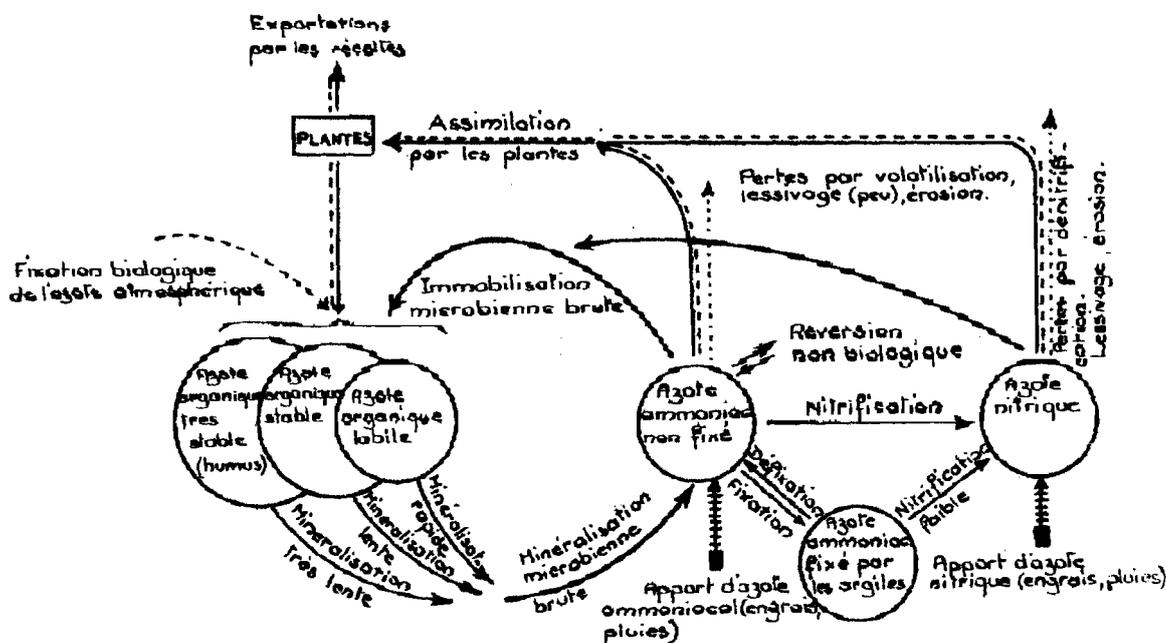


- Transformations biologiques de l'azote dans le sol

Il est possible de dissocier cette évolution et l'ensemble des transformations cycliques qui, par l'intermédiaire des végétaux conduisent des formes minérales aux formes organiques puis, par l'intermédiaire des micro-organismes telluriques (décomposeurs), conduisent des formes organiques aux formes minérales, est désigné sous le nom de cycle biogéochimique et plus rarement sous celui de cycle externe. Les transformations homologues qui consistent aussi dans la succession de processus d'immobilisation (brute) et de minéralisation (brute) et qui sont le fait exclusif de la microflore tellurique constituent le cycle interne de l'azote (JANSSON, 1958) ou cycle d'immobilisation-minéralisation car elles se déroulent à l'intérieur même du sol, alors que le cycle biogéochimique, qui est lié à la végétation, implique un passage de l'élément azote hors du sol.

Les deux processus, minéralisation brute et immobilisation brute, se développent simultanément dans le sol, de sorte qu'on observe seulement un effet net, différence entre ces deux processus. Lorsque les processus de minéralisation brute l'emportent sur ceux d'immobilisation brute, la teneur en azote minéral du sol diminue : il y a immobilisation nette. Sur le plan agronomique, c'est la minéralisation nette qui importe, puisqu'en définitive l'approvisionnement en azote des plantes se fait à partir de l'azote minéral effectivement présent dans le sol ; cette dernière se traduit par l'évaluation des variations de la teneur en azote minéral du sol. Si l'on veut définir avec plus de précision le ou les cycles de l'azote, il est nécessaire de faire appel aux méthodes isotopiques afin de déterminer l'importance des processus bruts.

#### CYCLE DE L'AZOTE



-Cycle interne de l'azote. Le cycle interne de l'azote (syn. : cycle d'immobilisation-minéralisation) est représenté par un trait continu épais. Le cycle externe de l'azote (syn. : cycle biogéochimique) est représenté par un trait continu doublé d'un trait interrompu. Sur ce diagramme, on a distingué arbitrairement trois degrés dans la stabilité de l'azote organique du sol ; en fait, il existe tous les intermédiaires entre les formes stables (par exemple : azote humique) et les formes franchement labiles (par exemple : acides aminés libres).

## II - SOURCES d'AZOTE

### A - Azote atmosphérique

#### 1 - Azote des pluies :

Les quantités d'azote apportées par l'eau de pluie se rattachent étroitement à la densité de la population et aux activités de l'homme (VAN SCHREVEN 1965). Dans les régions tempérées elles varient de 1 à 10 kg par hectare et par an, mais elles peuvent exceptionnellement atteindre 50 kg ha, dans les zones industrielles.

#### 2 - Fixation non symbiotique :

Outre les représentants des Azotobacter, des Beijerinckia et des Clostridium de nombreux groupes interviennent tels les Azotomonas, certains bactéries photosynthétiques et algues bleues. De toutes façons cette fixation dépend de la richesse en carbone du sol et ne dépasse pas, sous nos climats, quelques kgs par hectare et par an (DELWICHE 1956), pour atteindre 50 à 100 kg dans les sols les plus favorables (sols hydromorphes)

#### 3 - Fixation symbiotique :

Les quantités fixées par les diverses souches de Rhizobium varient, généralement, entre 30 et 50 kg d'azote par ha et par an et dépendent de divers facteurs : l'espèce, la variété et l'âge des légumineuses, les souches de Rhizobium et les interactions de ces souches, le nombre de plantes par ha, la quantité d'azote minéral dans le sol, la présence de molybdène, la température, la lumière, le pH du sol et généralement tous les facteurs qui influencent la croissance de la plante. D'après MOORE (1966) des gains plus élevés de l'ordre de 100 kg, ne sont pas exceptionnels. A noter que cette fixation n'est pas l'apanage exclusif des légumineuses mais s'effectue à partir d'espèces nodulées telles que Alnus, Casuarina

### B - Azote organique

#### 1 - Azote minéralisé à partir de l'humus

Nous avons détaillé précédemment les facteurs intervenant sur cette minéralisation (cf. cours d'agrologie). L'azote minéralisé à partir de l'humus est libéré, en moyenne, de mars à octobre, avec des décalages plus ou moins importants suivant les conditions climatiques de l'année. Les cultures à long cycle végétatif (betteraves) peuvent bénéficier de la totalité de cet azote minéralisé.

Les autres cultures, notamment les céréales et pommes de terre précoces, ne bénéficient que d'un certain pourcentage de l'azote minéralisé en cours d'année. D'autre part, l'azote minéralisé après les récoltes peut contribuer à l'alimentation azotée de la culture suivante :

Les quantités d'azote minéralisé après les récoltes exprimées en % de la minéralisation annuelle sont de l'ordre de :

Blé précoce, colza	60 %
Blé tardif	50 %
Pommes de terre, primeurs	50 %
Pommes de terre, consommation	30 %
Betteraves	0 %

2 - Azote provenant des résidus enfouis

Comme pour l'humus nous nous contentons de vous rappeler le bilan. Le tableau ci-dessous donne les quantités d'azote généralement disponibles après les récoltes suivants :

RESIDUS de RECOLTES	AZOTE pour % de POIDS BRUT	RESIDUS BRUTS	Kilos/ha.			
			AZOTE TOTAL	HUMUS PRODUIT	AZOTE BLOQUE PAR L'HUMUS	AZOTE DISPONIBLE
Racines et Chaumes de céréales .....	5,0	2.500	12,5	500	25	- 12,5
Pailles et Balles ...	5,0	4.500	22,5	1.000	50	- 27,5
Racines : Chaumes de maïs ..	6,0	3.500	21,0	800	40	- 19
Tiges : Feuilles de maïs ..	5,0	5.000	25	1.000	50	- 25
Feuilles : Collets de betteraves ...	3,2	30.000	96	1.200	60	+ 36
Pommes de terre ( fanes) ..	5,0	5.000	25	0	0	+ 25
Golza ( racines, tiges, silique) ..	6,0	10.000	60	2.300	115	- 55
Luzerne 2 ans, racines et chaumes	12,5	12.000	150	1.500	75	+ 75
Dernière coupe de luzerne .....	7,2	6.400	46	400	20	+ 26
Trèfle violet 1 an ( racines et chaumes)	11,0	8.000	90	500	25	+ 65
Engrais vert .....	5,0	20.000	100	1.000	50	+ 50

- FUMIER : Le fumier contient de 5 à 8 kg d'azote à la tonne. Une tonne de fumier donne 100 kg d'humus qui bloque 5 kg d'azote. Il reste donc disponible pour les cultures suivantes de 0 à 3 kg d'azote par tonne de fumier suivant que le fumier est pailleux ou bien décomposé.

## C - Azote minéral

### 1- Action des engrais azotés apportés à la culture

GADET et SOUBIES ont étudié le bilan du lessivage à partir des cases lysimétriques et ceci pendant quinze années consécutives (1950-1965). Certaines cases recevaient 50 unités d'azote, d'autres rien ; la moyenne annuelle indique les chiffres suivants :

- Pertes par drainage de la case sans engrais : 120 unités
- Pertes par drainage de la case avec 50 unités d'azote ..... 148,8 unités

Si l'on estime, comme on a coutume de le faire, que l'azote disponible est égal à celui du traitement sans engrais additionné de l'apport, ce bilan fait ressortir un déficit apparent de :  $(120 + 50) - 148,8 = 21,2$  kg soit 42,4 % de l'azote apporté.

Plus récemment le dispositif fut repris en utilisant de l'engrais N 15. Après quatre ans, les exportations totales furent respectivement de :

- Case sans engrais ..... 551,5 kg
- Case avec 4x50 kg d'engrais ..... 705 kg

Le déficit apparent devient alors de  $(551,5 + 200) - 705 = 46,5$  kg pour les quatre ans. Mais l'azote de l'engrais étant marqué il a été retrouvé à 98% dans les eaux de drainage. On peut donc déduire qu'en présence d'engrais la minéralisation a été diminuée de  $705 - 196 = 509$  kg au lieu de 551 kg pour le terrain. Dans ce cas la fumure minérale a réduit la fourniture d'azote au sol. Il était donc important de mentionner ce rôle de l'azote minéral dans les phénomènes de réorganisation et de ralentissement de la minéralisation, avec comme conclusion un stockage pluriannuel d'une partie de N minéral. En dehors du lessivage classiquement mesuré, les pertes d'azote minéral provenant des engrais appliqués au sol sont très faibles et bien inférieures à ce qu'un bilan apparent laisserait croire.

TURTSCHIN (1960) a montré après un apport de sulfate d'ammonium marqué au N 15 que 60 % était utilisé par la plante et 17% incorporé à la matière organique du sol; La disponibilité annuelle de cet azote résiduel a été étudiée par JANSSON (1963) et dans ces conditions d'expérience cet auteur l'estime à 1 % de la quantité apportée à l'origine.

Enfin, il nous faut mentionner la fixation de l'ion ammonium, sous forme non échangeable, dans certains types d'argile. Cette fixation peut être quantitativement importante ( jusqu'à 2,4 me de  $NH_4$  pour 100 g d'argile, HIMMAN (1964) et elle interfère avec les transformations biologiques de l'azote ; les expériences de JANSSON ( 1958) indiquent que les nitrifiants peuvent utiliser une partie de  $NH_4$  fixé; par contre la microflore hétérotrophique ne peut utiliser l'azote ammoniacal non extractible par KCl normal.

2 - Arrière effet des engrais azotés minéraux se rattachant au paragraphe précédent. Cette étude a été menée, en France, par plusieurs équipes de chercheurs :

- MOREL et AL (1964) montrent qu'après huit années consécutives d'un même traitement appliqué à un sol cultivé de Grignon, le taux d'azote minéral des parcelles recevant un engrais azoté est significativement supérieur à celui des parcelles témoins de 12,6 %. Cependant, la différence d'azote est plus importante si l'on étudie l'accroissement de la teneur en

humus. D'après les auteurs on enregistrerait une augmentation pendant les huit années de l'ordre de 2 700 kg d'humus, soit 27 x5 (135) d'azote et ceci pour la couche arable du sol.

A l'inverse, CHABANNES et BARBIER (1964) à Versailles constatent des variations très importantes d'azote minéral du sol. Celles-ci pouvant atteindre suivant la saison, au cours d'une culture de betteraves, une valeur de 400 kg d'azote minéral entre une parcelle témoin et la parcelle recevant annuellement 145 kg d'azote.

Ces résultats ne sont qu'apparemment contradictoires, il se pourrait qu'à Grignon, l'azote soit stocké sous forme d'humus stable et qu'à Versailles, il s'agisse essentiellement de formes organiques labiles susceptibles de se minéraliser largement au printemps. En effet, d'après AUBERT (1964) à Grignon les sols étant calcaires, l'humus calcique formé serait plus stable, tandis qu'à Versailles le sol limoneux non calcaire présente des caractères de sol lessivé.

### III - PERTES d'AZOTE

#### A - Exportation par les récoltes

Il est possible soit de considérer le rendement maximum qu'une culture pourra atteindre si les conditions climatiques sont favorables, soit le rendement moyen d'une culture au cours de plusieurs années successives. Le besoin global des récoltes en fonction de la productivité correspond aux normes indiquées par HEBERT (1960) et résumées précédemment dans le chapitre Azote et plante.

En outre d'après GROS (1962) à une unité d'azote correspond une production supplémentaire moyenne de l'ordre de :

- Blé, Orge : 15 kg de grain
- Paille : 25 "
- Sucre : 10 "
- Pomme de terre : 70 "
- Foin sec : 60 "
- Viande : 4-5 kg
- Lait : 20 litres

#### B - Lessivage

Nous avons vu les difficultés d'apprécier l'intensité de lessivage. Il ne faut pas oublier de déterminer la quantité d'eau infiltrée en fonction de la nature et de la profondeur du sol. D'autre part, afin de diminuer ces pertes, il est intéressant de pratiquer des cultures dérobées ou d'engrais vert pendant la période de lessivage d'automne, enfin l'enfouissement des pailles est également un moyen très efficace, de freiner les pertes d'azote par lessivage.

### C - Pertes par dénitrification

Celles-ci sont surtout importantes en présence de conditions d'anaérobiose et se traduisent par un dégagement de  $N_2$ ,  $N_2O$  et même  $NO$ . La volatilisation de l'azote est stimulée par l'addition de matières carbonées, par l'augmentation de la température (Optimum 60-65°), par contre la valeur du pH l'abaisse, en dessous de 5,5, la dénitrification diminue considérablement. Les pertes peuvent atteindre 100 kg par hectare et par an, et l'on peut, avec BROADLENT et CLARK (1965) distinguer deux catégories :

a) Les pertes normales, qui sont des pertes lentes et progressives dues à l'existence dans le sol, même bien drainé, de microhabitats favorables à la dénitrification. On peut penser que ces pertes représentent grosso modo 10 à 15 % de la production annuelle et de l'apport d'azote nitrique.

b) Les pertes accidentelles, rapides et importantes, qui apparaissent lorsque l'ensemble du sol est placé dans des conditions écologiques concourant simultanément à la stimulation maximale du processus de dénitrification : présence de nitrates, présence de matière organique facilement métabolisable, humidité élevée (provenant soit de pluies importantes, soit de submersion) température élevée. Il semble qu'en région tempérée, ces conditions particulières se rencontrent rarement, sauf dans les prairies où les pertes par dénitrification peuvent atteindre et dépasser 50 % de l'azote apporté. Dans les régions tropicales, il est probable que les pertes d'azote par dénitrification sont parfois considérables. Aussi pour réduire les pertes par dénitrification, il est classique de conseiller :

- 1°- l'apport d'engrais sous forme ammoniacale et non nitrique ;
- 2°- le contrôle de la nitrification par adjonction d'inhibiteurs ;
- 3°- le fractionnement des apports de matière organique fraîche qui, on l'a vu, stimulent la microflore dénitrifiante.

## CHAPITRE III - BILAN

Celui-ci peut s'effectuer au niveau de la parcelle ou à l'échelon de l'exploitation ou de la région naturelle ; il est utile de tenir compte de la succession des cultures au cours d'une rotation.

### A - Au niveau de la parcelle

La meilleure méthode consiste à la mesure systématique de la minéralisation en place. On enregistre le résultat de l'équilibre réalisé, entre la minéralisation et la réorganisation, pendant l'intervalle de temps séparant deux mesures qui doivent être très nombreuses. C'est donc une méthode assez laborieuse mais présentant de nombreuses possibilités. Elle fournit, en effet, deux types de données :

- Les unes quantitatives qui permettent de chiffrer l'efficacité des réserves ou de voir l'influence immédiate de divers traitements organiques ou minéraux
- Les autres qualitatives qui renseignent sur l'allure et le rythme de minéralisation.

#### 1 - Dispositif d'essai ( Hébert et Kottelanne 1965)

Il sera utile d'implanter le dispositif dans un champ homogène et sans relief, pour éviter le drainage latéral. On adjoindra deux autres parcelles de part et d'autre de l'essai qui recevront plus ou moins 20 kg que la

fumure présumée normale appliquée sur les parcelles cultivées du dispositif d'essai. On choisira un champ inclus dans un système cultural normal en évitant les parcelles ayant servi par exemple de champ d'essai et ayant reçu des fumures organiques anormalement élevées plus fréquentes pour la région ; de même le précédent légumineux sera exclus.

**Dispositif d'essais**

+ 20 N			
1	3	5	7
2	4	6	8
- 20 N			

**Première année :** - 1 parcelle nue sans azote ;  
 - 2 parcelle nue avec azote ;  
 - 3 - 4 parcelle cultivée avec azote .

**Deuxième année :** - 1 - 2 parcelle cultivée sans apport N ;  
 - 3 -4 parcelle nue avec et sans N ;  
 - 5 -6 parcelle cultivée avec N.

**Troisième année :** - 1-2-3-4 parcelle cultivée sans apport ;  
 - 5 -6 parcelle nue avec ou sans N ;  
 - 7 -8 parcelle cultivée avec N.

Les cultures recevront une fumure de fond uniforme. La surface parcellaire correspondra à 10 ares en sol meuble, 15 ares en sol caillouteux. Les prélèvements seront effectués tous les 15 jours par réalisation de trois sondages dans chaque parcelle. A cette occasion, les dosages d'humidité complèteront la détermination du sol en azote minéral. Au départ de l'expérience on entreprend la description pédologique d'un profil complet. Pendant les trois années, on relève les variations de température et de pluviométrie.

## 2 - Exemple

STATION AGRONOMIQUE  
DE L'AISNE  
LAON

Résultats d'analyses au 29.9.65 au  
Champ d'essai de LIMEY  
Suivi par M. JACQUIN, E.N.S.A. - NANCY

ETUDE N MINERAL

date des prélèvements	N° de la par- celle	Pro- fon- deur en cm	EAU		AZOTE MINERAL					OBSERVA- TIONS
			o/oo de terre sèche	En tonnes p/ ha.	p.p. m		en Kilos par Ha			
					ammo- niacal	nitri- que	ammo- niacal	nitri- que	Total	
29.9.65	I	0-20	249,1	713	0	15,80	0	45,20	45,20	
		20-40	201,1	692	0	5,55	0	19,00	19,00	
		40-60	103,1	365	0,65	1,00	2,20	3,40	5,60	
		60-80	137,8	488	0,10	2,15	0,30	7,60	7,90	
		80-100	133,8	455	0,25	1,85	0,80	6,20	7,00	
"I	II	0-20	228,8	655	0	11,10	0	31,70	31,70	
		20-40	123,9	427	0	4,20	0	14,30	14,30	
		40-60	117,5	416	0,75	0,45	2,60	1,50	4,10	
		60-80	100,3	355	0	0,60	0	2,10	2,10	
		80-100	97,8	333	2,60	2,75	8,70	9,20	17,90	
"	III	0-20	233,2	667	0	11,55	0	32,90	32,90	
		20-40	146,4	483	0	5,95	0	20,40	20,40	
	IV	40-60	112,5	399	1,10	0,95	3,80	3,40	7,20	
		60-80	108,5	384	0	1,15	0	4,00	4,00	
		80-100	128,5	437	0,15	0,75	0,50	2,60	3,10	
		0-20								
		20-40								
		40-60								
		60-80								
		80-100								

### 3 - Résultats généraux

Dans les parcelles nues, on obtient les possibilités de minéralisation compte tenu du précédent cultural ; ceci permet d'interpréter plus facilement les données climatiques et particulièrement l'influence du climat de l'année sur les résultats d'une expérience d'engrais azotés dans les conditions de plein champ.

L'évolution de l'engrais dans les parcelles non cultivées, présente un intérêt également important dans le cas de jachères, déchaumage, cultures sarclées, plantations fruitières et vignes.

Dans les parcelles cultivées normalement on note la minéralisation et l'utilisation de l'azote par la culture.

Les parcelles cultivées sans azote permettent de contrôler l'azote perdue par drainage ainsi que les possibilités de récupération par la culture et la fourniture par la minéralisation propre du sol en l'absence de résidus culturaux.

Les deux parcelles annexes serviront de contrôle aux conseils donnés pour la fertilisation azotée.

Si l'on peut discuter des résultats partiels, il est possible de dégager quelques remarques d'ensemble :

a) - Les quantités d'azote minéralisées par une terre au cours de l'année présentent des variations relativement restreintes autour d'une moyenne. Elles pourraient être sommairement appréciées par 3 prélèvements effectués :

- L'un au printemps après cessation du drainage - L'autre en juillet ; le troisième au automne avant le retour du sol à la capacité de rétention.

b) Le précédent cultural intervient de trois façons :

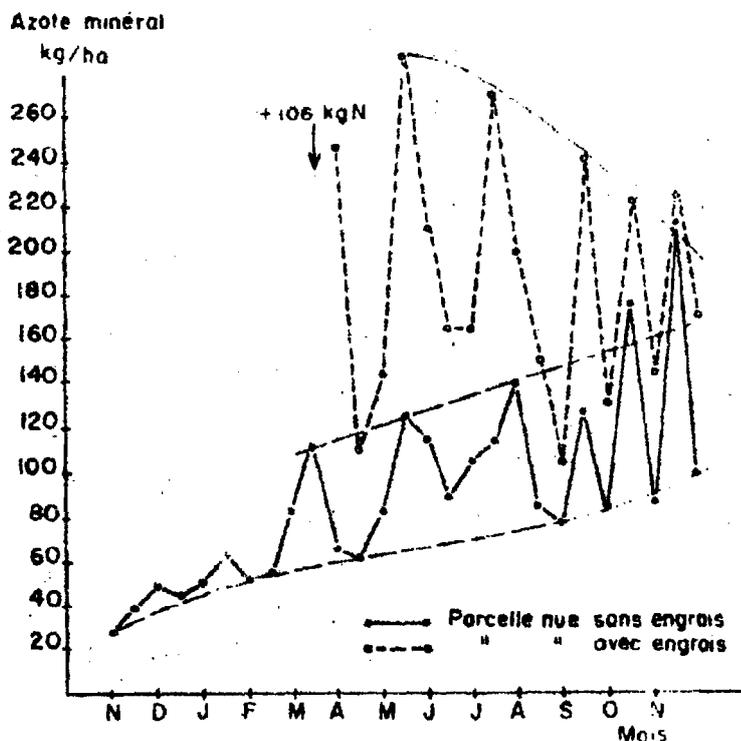
- Par son pouvoir asséchant entraînant un retour plus ou moins tardif à la capacité de rétention, donc un drainage hivernal plus ou moins important.

- Par l'apport des résidus organiques dont l'enfouissement à une époque judicieuse provoque une activité microbienne telle que la partie de l'azote présente se trouve bloquée et soustraite au drainage.

- Ces mêmes résidus d'azote organique sont susceptibles de se minéraliser ; or la minéralisation de cet azote organique peut déjà être en grande partie accomplie en automne ou en fin d'hiver .

c) Les courbes en dents de scie seraient le reflet du mécanisme d'équilibre entre les deux processus de minéralisation et de réorganisation aux conséquences contraires et prédominant à tour de rôle. Dans un sol apparemment stabilisé, c'est-à-dire n'ayant pas reçu récemment de matériaux hydrocarbonés consommant de l'azote minéral, ni de produits organiques riches en azote, tout se passe comme si la minéralisation se poursuivait jusqu'au moment où l'azote accumulé ait atteint une quantité au-delà de laquelle la production s'arrête et où la retransformation en azote organique devient dominante. Inversement, quand la teneur en azote minéral a ainsi atteint un niveau minimum c'est la minéralisation qui l'emporte à nouveau. On peut alors penser que toute cause susceptible de faire baisser le niveau d'accumulation d'azote minéral ( lessivage, prélèvement, réorganisation) favorise la minéralisation. Inversement, l'apport extérieur d'un excès d'azote minéral modifie le rythme de la minéralisation avec un phénomène de résorption

progressive. La teneur du sol en azote minéral s'abaisse peu à peu jusqu'à celle du sol sans engrais. Ces observations pourraient expliquer comment la fumure azotée minérale peut être plus ou moins bien utilisée par la culture et montrent également comment les fumures azotées excédentaires peuvent être résorbées et stockées.



Cette allure confirme que le sol est le siège de deux processus aux conséquences contraires, prédominant à tour de rôle ; la minéralisation dans des conditions données se poursuivrait jusqu'à ce que la teneur en azote minéral atteigne un certain niveau, au delà duquel le processus inverse de réalisation de l'azote minéral deviendrait prépondérant.

#### B - Interprétation en fonction du type de sols

HEBERT et AL (1965) et LEFEVRE (1966) ont dégagé les premières conclusions des résultats enregistrés dans trente cinq profils répartis dans la moitié Nord de la France. Ces auteurs ont classé les courbes annuelles en plusieurs types.

##### a) Sols à minéralisation croissante et élevée

L'accumulation d'azote minéral à une allure générale croissante déclenchée en mars pour atteindre son maximum en automne ; il n'y a pas d'azote ammoniacal en quantité importante. Ce type de minéralisation est caractéristique des sols à bon drainage à pH légèrement alcalin ayant un taux de matière organique normal. La courbe type correspond à celle des sols limoneux profonds ou des sols calcaires enrichis en matière organique. Pour la première catégorie de sol, l'apport d'engrais

se marque immédiatement mais la quantité maximum d'azote minéral en fin de saison ne dépasse pas celle observée en parcelle nue sans engrais par suite d'un phénomène d'autorégulation de la minéralisation.

#### b) Sols à faible taux de minéralisation

Donc avec accumulation progressive d'azote minéral moins prononcée que précédemment et accompagnée de la présence en quantités importantes d'azote ammoniacal. Ce type de courbe a été trouvé avec des sols plus ou moins battants, ayant un pH légèrement acide.

#### c) Sols hydromorphes

La minéralisation est moyenne et progresse au cours de l'été avec de brusques variations. L'azote ammoniacal représente environ 50 % de l'azote minéral. L'apport de l'engrais se marque normalement.

#### d) Sols à minéralisation faible ou nulle

Trois types de sols ont donné cette réaction se subdivisant elle-même en deux si :

1) l'on peut doser une quantité d'azote ammoniacal plus importante que la quantité d'azote nitrique : - sols de limons lourds argileux ;  
- sols acides de Bretagne.

2) On constate l'absence d'azote ammoniacal en quantités notables : - sols calcaires pauvres.

Pour ces sols à minéralisation faible : Ou bien, l'engrais marque rapidement et son action diminue lentement au cours de l'été ; Ou bien l'azote minéral disparaît très rapidement par suite d'une réorganisation intense. Cette évolution différencie fondamentalement les sols à minéralisation faible. Pour les uns, les conditions de milieu sont défavorables à toute activité microbienne et ils doivent être entièrement soutenus par des fumures minérales, Pour les autres, cette activité peut être réveillée et il s'agit alors seulement de sols pauvres qui peuvent être améliorés par des apports copieux de matière organique et d'engrais minéraux.

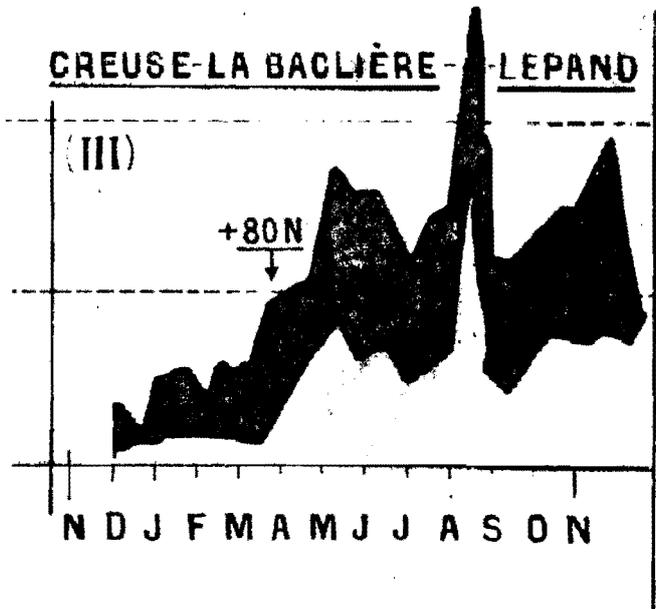
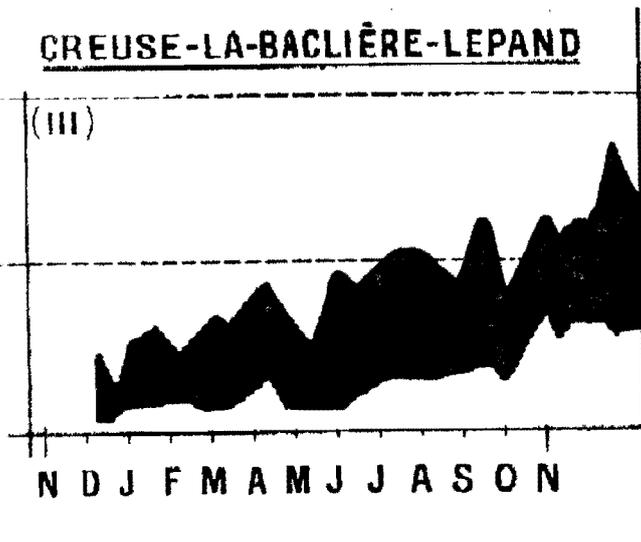
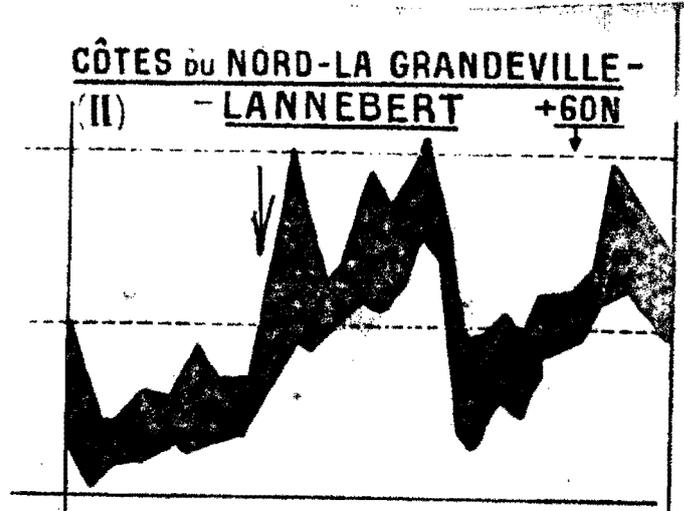
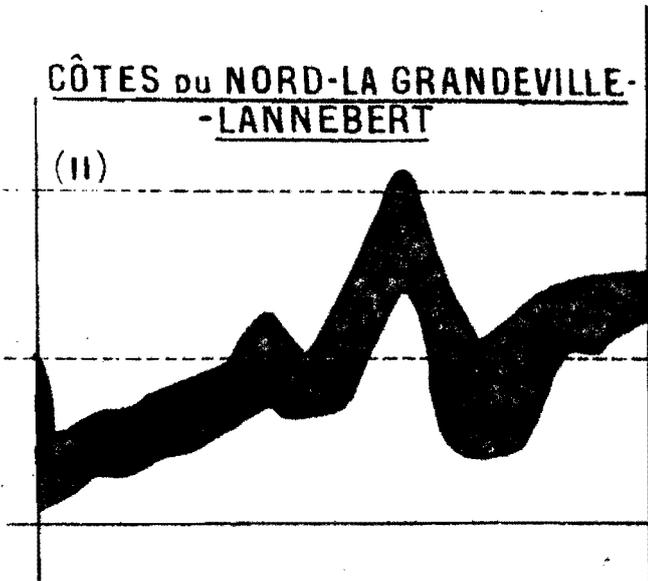
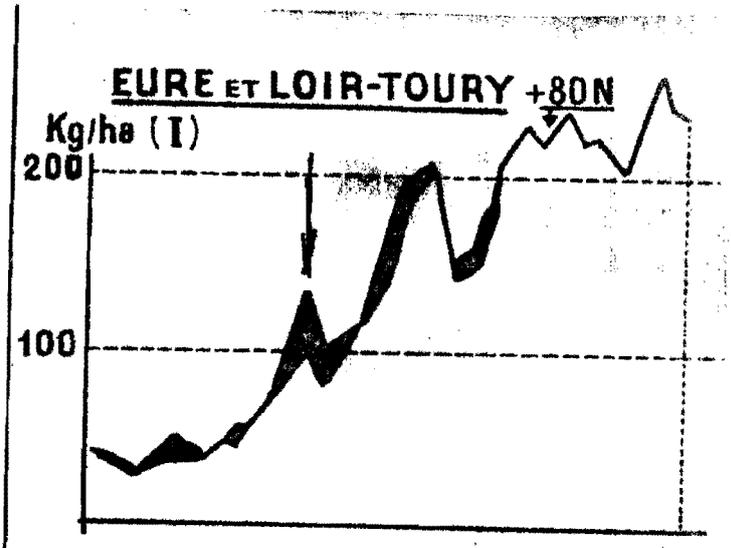
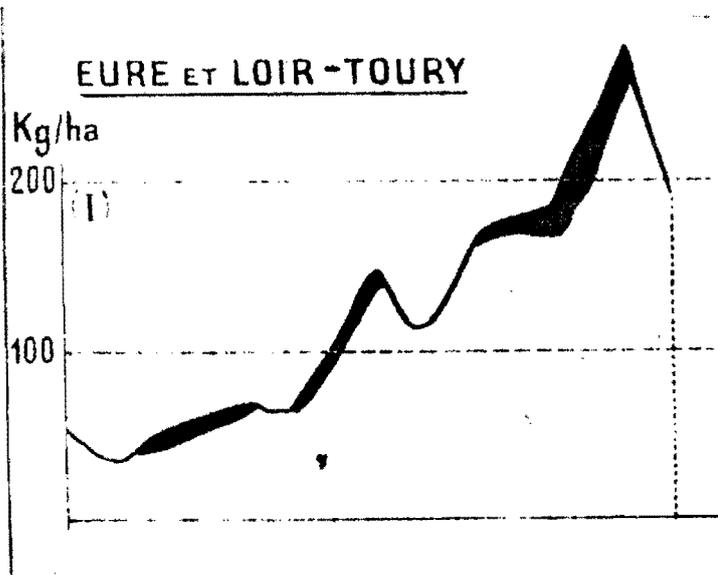
#### C - Facteurs intervenant sur l'équilibre N minéral/N organique

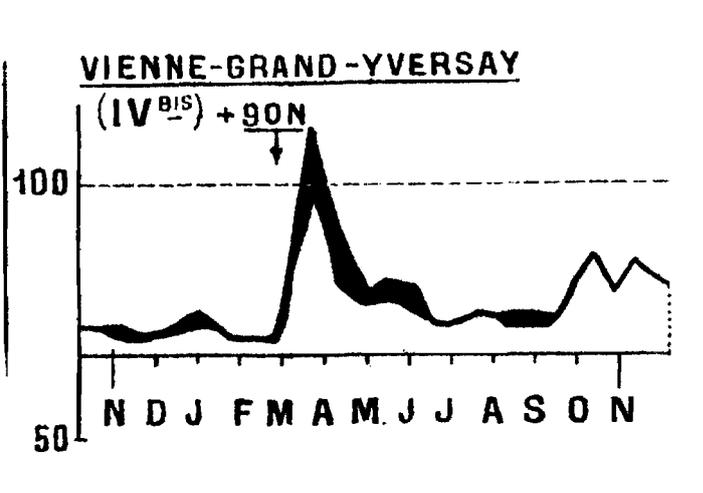
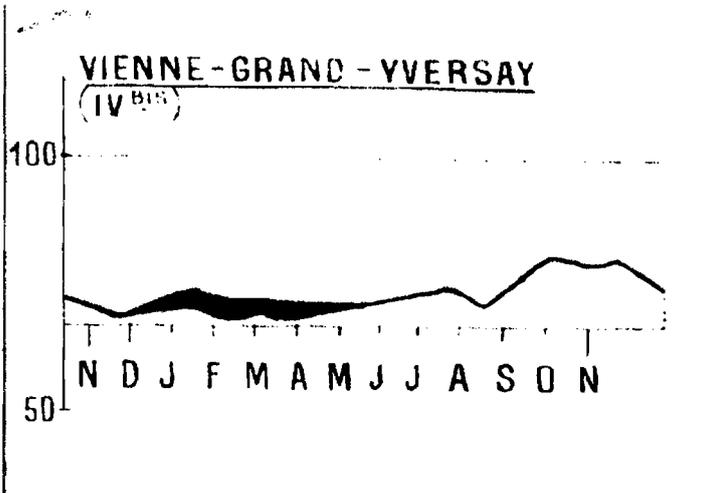
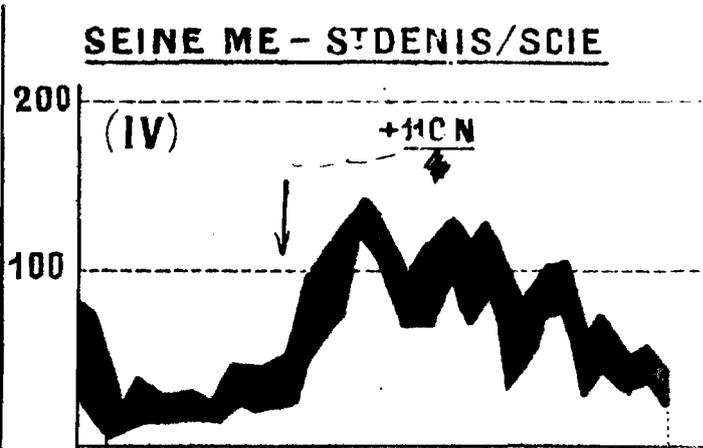
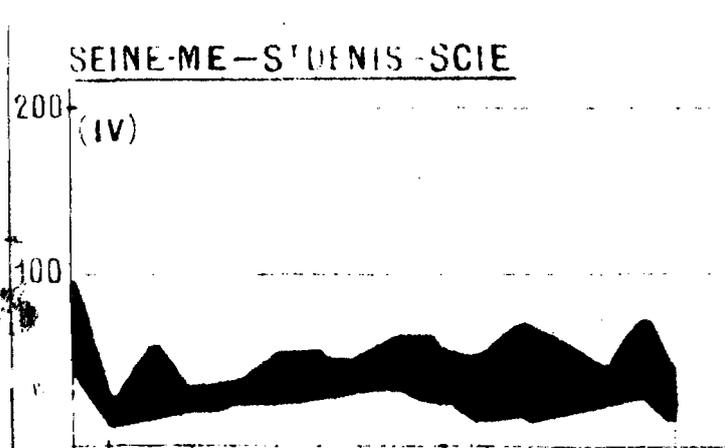
1) Température : Les variations de la teneur en azote minéral au cours d'une journée montre<sup>nt</sup> des fluctuations rapides mais ces oscillations se rencontrent également en profondeur où la température est beaucoup plus stable. En fait sur une longue durée on se rend compte que la quantité d'azote minéralisé dépend de la température moyenne de l'année ; sous nos climats on peut atteindre 200 kg en année chaude ( HEBERT et KOTTELANNE ( 1965).

2) Humidité : Le maximum de minéralisation s'observe par une humidité correspondant aux 2/3 de la capacité au champ ; cependant pour une humectation il peut se produire soit une minéralisation, soit une réorganisation selon que l'humidité de sol se trouve au dessous ou au dessus de cet optimum.

- En sol sec la dessiccation s'accompagne d'un rapide abaissement de l'azote minéral alors que l'humectation provoque une brusque minéralisation.

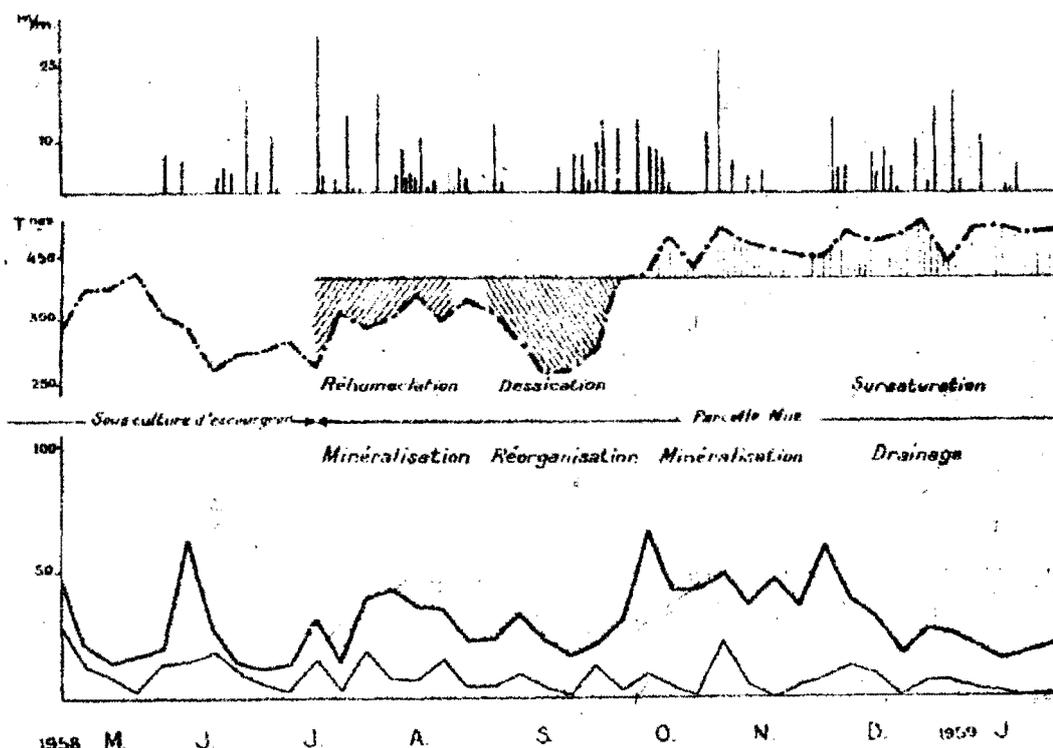
- En sol humide une humectation supplémentaire provoque une réorganisation.





{  *N. americana*  
 {  *N. nitrique*

BERRY-au-BAC (SOL ET SOUS-SOL CALCAIRE 50 à 55%  $CO_3Ca$ )



Influence de l'humidité sur la minéralisation en sol crayeux d'après HEBERT et KOTTELANNE (1965)

3) Teneur en matière organique : Outre l'influence d'une incorporation de matière organique il ne faut pas oublier que les conditions climatiques par l'intermédiaire des microorganismes provoquent des " décharges " de carbone métabolisable à partir du stock contenu dans le sol. D'autre part les mouvements de l'eau se chargent de répartir ce carbone à différents niveaux.

4) Teneur en azote du sol : Les apports d'azote minéral ne se reflètent pas toujours immédiatement et fidèlement sur les graphiques même quelquefois s'ils sont effectués devant de mauvaises conditions climatiques azotées n'apparaissant pas. On remarque également qu'on ne retrouve pas des quantités équivalentes d'azote ammoniacal et nitrique après apport d'ammonitrates. En résumé l'activité microbienne prépondérante qui s'exerce immédiatement en cas de modification du milieu chimique sera celle qui aura pour effet de provoquer un retour à l'équilibre carbone utilisable/azote minéral habituel sous les conditions climatiques locales.

5) Influence des façons culturales : Celles-ci modifient :

- a) Les conditions physiques : ameublissement ou tassement ayant pour effet d'aérer ou de réduire cette aération et de modifier la remontée capillaire.
- b) Les conditions chimiques, en redistribuant les matières organiques et les colonies microbiennes.

Une façon culturale peut donc avoir, suivant les circonstances, des effets opposés : un hersage aère le sol et conduit généralement à une

minéralisation ; un roulage amène d'ordinaire une réorganisation; un labour peut immédiatement provoquer la réorganisation d'un apport d'engrais azoté s'il est fait en hiver en présence d'un excès de matière organique et de mauvaises conditions de minéralisation ; au contraire, un déchaumage provoque une minéralisation accélérée. On constate donc que l'agriculteur peut intervenir sur la dynamique de l'azote et le sort des engrais azotés par le jeu des façons culturales. Par exemple, il paraît possible de limiter les pertes par drainage d'un engrais apporté en hiver en l'appliquant au moment du labour, la réorganisation immédiate le soustraira, pendant un temps suffisant, à l'action des pluies.

#### D - Applications pratiques ( T.P. sur la fumure azotée )

La quantité d'engrais azotés à apporter correspond à la différence entre l'objectif de fourniture ( rendement prévu) et l'azote minéral présent ou obtenu au cours du développement des plantes cultivées.

exemple : 50 qx de blé x 3 unités d'azote ..... 15 0 unités  
 reliquat d'azote minéral à la récolte ..... 3 0 unités  
 18 0 unités

Si au départ de la végétation, le sol contient 20 kg d'azote minéral à l'hectare et que l'on escompte une minéralisation voisine de 60 unités/ha, il faudra prévoir un apport de 100 unités d'azote sous forme d'engrais minéraux.

#### E - Bilan à l'échelon régional

Ce bilan permet d'éviter des erreurs grossières de gestion et de corriger les causes de déséquilibre flagrants. Son emploi détaillé est plein d'enseignements que l'on peut encore associer à d'autres données économiques et techniques.

Un bilan apparemment équilibré n'est pas forcément favorable, ce bilan peut, en effet, être le résultat d'un équilibre entre des productions très faibles et des apports presque nuls. Par contre si un bilan équilibré est accompagné d'une production abondante, il est plutôt l'indice d'une utilisation rapide de l'engrais apporté ou de sa rotation accélérée au travers de la phase organique.

Le cas de bilans déséquilibrés sont également très intéressants s'ils sont prévus ou voulus. Les cultures restituant moins d'azote qu'elles en reçoivent peuvent être volontairement introduites dans une rotation pour accumuler les réserves organiques et il est plus facile, comme nous l'avons déjà dit, de suivre cette accumulation par le bilan que par la mesure directe de l'accroissement de l'azote total du sol.

De même la vitesse de décomposition de réserves constituées au préalable peut être suivie par le bilan excédentaire réalisé sur les cultures destinées à en bénéficier.

En résumé, les problèmes suivants peuvent être envisagés en utilisant la méthode des bilans :

- Mesure de la vitesse de rotation de l'azote minéral fourni ;
- Mesure régionale du niveau d'équilibre obtenu avec divers systèmes cultureux.
- Influence des modalités de fourniture de l'engrais, de l'utilisation des restitutions organiques de formes diverses, sur l'équilibre azoté ;
- Rentabilité de l'introduction de cultures de légumineuses ;
- Mesure de l'accumulation de réserves utilisables ( cas des prairies, par ex.)
- Mesure de la vitesse de récupération de ces réserves ;
- Evaluation des pertes inévitables, etc...

## CHAPITRE IV - ENGRAIS AZOTES

### I - COMPORTEMENT DANS LE SOL

Il est inutile de répéter ici ce que nous avons signalé des comportements respectifs de l'azote nitrique et de l'azote ammoniacal dans le sol ; rappelons simplement l'influence du type de sol, des pluies, de la température, éventuellement de l'état du sol au moment de l'apport d'engrais ( porosité, précédent cultural, apport de matières organiques riches en cellulose et en lignine ). On reconnaît aux deux formes des avantages et des inconvénients qui varient constamment et peuvent jouer de manière différente suivant la situation et le climat de l'année.

Avec l'azote ammoniacal : fixation immédiate au niveau de l'application, pas de lessivage, effet pouvant être différé en raison de l'adsorption par les colloïdes du sol. Le délai de nitrification est d'ailleurs souvent surestimé, sauf en plein hiver ou dans les sols très acides ou mal aérés. Les risques de pertes d'ammoniac gazeux en sols sableux ou très calcaires sont à prendre en considération et nécessitent un léger enfouissement immédiat.

Avec l'azote nitrique : lessivage immédiat en cas de pluie, risque de pertes par percolation dans les sols peu profonds, pas de volatilisation d'azote en cas d'épandage superficiel en sols calcaires, enfin effet immédiat pour les cultures.

L'utilisation judicieuse des avantages respectifs des deux formes présente de grandes difficultés, essentiellement en raison de l'impossibilité de prévision du climat et les comparaisons entre engrais ammoniacaux et engrais nitriques donnent très généralement des résultats variables suivant la culture, le site et le climat de l'année. Aussi l'emploi d'azote sous forme mi-nitrique, mi-ammoniacal est-elle particulièrement commode. Le nitrate d'ammoniaque est donc largement utilisé d'autant plus qu'il permet d'apporter l'unité d'azote à un prix très compétitif.

### II - ENGRAIS ORGANIQUES

#### A - Sang desséché

Il résulte de la coagulation et de la dessiccation du sang recueilli dans les abattoirs : 100 kg de sang frais donnent 20 kg de sang en poudre de couleur brun-noir et de composition suivante :

- |   |          |   |             |
|---|----------|---|-------------|
| - | N        | : | 10 à 13 %   |
| - | $P_2O_5$ | : | 0,5 à 1,5 % |
| - | $K_2O$   | : | 0,6 à 0,8 % |

Le sang desséché se conserve peu de temps et encore à l'abri de l'humidité. Il faut éviter tout contact avec la chaux ou le calcaire. Etant un des engrais organiques les plus actifs, il doit être incorporé immédiatement au sol.

**B - Produits à base de cornes**

- 1) - Cornailles : déchets de cornes - onglons - sabots, servent surtout de matières premières pour la fabrication des engrais azotés organiques.
- 2) - Frisons de Cornes : déchets de l'industrie du peigne ;
- 3) - Corne broyée : corne de pieds, de têtes ;
- 4) - Corne torréfiée : aussi efficace que le sang.

**C - Produits à base de cuir**

Le cuir solubilisé puis moulu subit un traitement par  $H_2SO_4$  ce qui élimine l'acide tannique et rend cette matière organique soluble à 50 % dans l'eau. Lorsque le cuir est torréfié il prend l'aspect du sang desséché mais sa valeur est très inférieure. Il ne faut jamais employer les déchets de cuir chromé, la présence de sesquioxyde de chrome entravant la nitrification et détruisant les nitrates préexistant dans le sol.

**D - Déchets de laine**

Leur action très lente est améliorée par un traitement à l'acide et l'action atteint alors 50 % de celle de  $NaNO_3$ .

**E - Tourteaux**

On utilise surtout les produits ne convenant pas à l'alimentation animale :

- Farines toxiques : moutarde - ricin - coton non décortiqué.
- Tourteaux avariés,
- Tourteaux sulfurés. Ces derniers ne doivent pas être employés au moment des semailles, car ils moisissent et entraînent la destruction des semences.

**F - Azorgan**

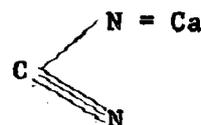
Cet engrais synthétique se subdivise toujours en plusieurs fractions plus ou moins polymérisées donc de propriétés différentes :

- Produits immédiatement solubles à l'eau à température ordinaire (monomères)
- Produits solubles à 100° (plus ou moins polymérisés)
- Produits non solubles (très polymérisés).

Ces diverses parties subissent dans le sol une hydrolyse chimique ou microbienne avec transformation en  $NH_3$  ; il s'agit donc d'une fourniture modulée de faible amplitude pouvant être complétée par une fumure minérale.

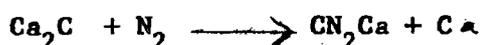
### III - ENGRAIS AMMONIACAUX

#### A - Cyanamide de chaux : $\text{CN}_2\text{Ca}$



##### 1) - Fabrication :

La cyanamide résulte de la combinaison de l'azote de l'air sur du carbure de calcium en fusion, en présence de catalyseur ( $\text{Cl}_2\text{Ca}$ ) ; 100 kg de carbure absorbant 20 à 25 kg de N.

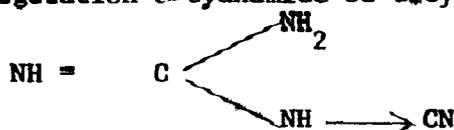


##### 2) - Caractéristiques :

Chimiquement pure elle dose 33 % d'azote et se présente en cristaux blancs solubles dans l'eau. Le produit industriel est mélangé à une certaine quantité de chaux et de charbon et il existe trois formes commerciales :

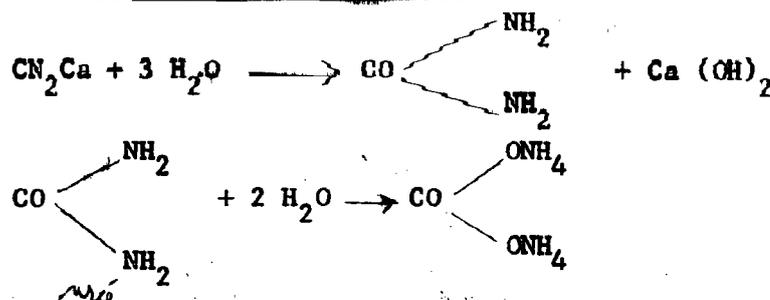
- Cyanamide en poudre 18 - 21 % d'azote
- Cyanamide en grains 20 - 24 % d'azote
- Cyanamide sous forme huilée utilisée pour les mélanges et les désherbants.

A l'air elle absorbe l'humidité et le  $\text{CO}_2$  d'où gonflement et délitement avec perte d'un peu de  $\text{NH}_3$  et naissance d'un produit toxique vis à vis de la végétation d'cyanamide ou dicyanodiamide.



##### 3) - Evolution dans le sol

Dans le sol elle se dissout rapidement et se transforme en  $\text{NH}_3$  puis  $\text{NO}_3$ . Ce cycle rapide dans les sols normaux correspond à une action légèrement plus lente que celle du sulfate d'ammonium.



##### 4) - Emploi

Surtout utilisé à l'automne et au printemps au cours de la préparation des terres (3 semaines avant les semailles) ; à conseiller sur certaines prairies acides.

#### B - Sulfate d'ammonium ( $\text{NH}_4$ )<sub>2</sub> $\text{SO}_4$

##### 1) - Préparation

Engrais obtenu par saturation directe de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  par le gaz d'ammoniac : ce dernier pouvant provenir de 5 sources différentes :

- Cokeries,
- Gaz,
- Distillation des eaux vannes de vidanges ,
- Distillation des solutions bitumeuses,
- Synthèse :  $N_2 + 3 H_2 \longrightarrow 2 NH_3 + 24 \text{ Calories}$

$H_2$  provient de l'électrolyse de l'eau de la liquéfaction de gaz de fours à coke, ou de cracking des hydrocarbures liquides.

$N$  provient de la liquéfaction puis distillation de l'air.

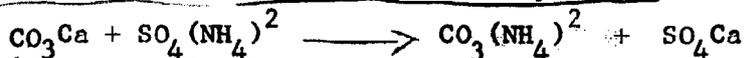
### 2)- Caractéristiques

Le sulfate d'ammonium pur dose 21,21 % d'azote, sa densité est de 1,76 et 100 parties d'eau à 10° dissolvent 73,65 parties de sel. Dans le commerce, on rencontre 5 qualités :

Ordinaire, 20 %, - sec, 20,4 %, - Normal, 20,6 % ; - Extra-sec 20,8% - Spécial, 21 %.

### 3)- Evolution dans le sol

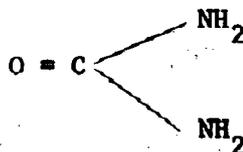
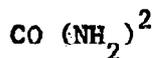
La cellule végétale absorbant plus rapidement  $NH_4$  que  $SO_4$ , il se produit donc une acidification du milieu. Dans les sols en présence de  $CO_3Ca$ , la neutralisation s'effectue très rapidement.



Donc l'ammonium est fixé par le sol sous forme ionique ( $NH_4$ ) et sous forme de  $CO_3(NH_4)_2$  mais en absence de calcium il n'y a pas de fixation par double décomposition. Dans tous les cas le  $SO_4Ca$  est entraîné au cours de la décalcification et en sol cultivé 100 kg de  $SO_4(NH_4)_2$  entraîne approximativement la perte de 60 kg de  $CO_3Ca$ ; en sol nu 100kg d'azote pur sous forme ammoniacale entraîne la perte de 700 kg de  $CO_3Ca$ .

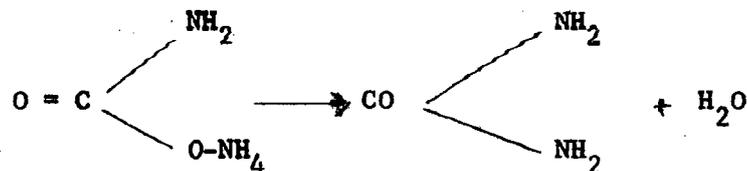
Sous climat sec, il peut se produire superficiellement des solutions concentrées toxiques et l'inverse si la nappe phréatique est très proche il se produit une stagnation avec phénomène de réduction /

### C - Urée



### 1) - Préparation

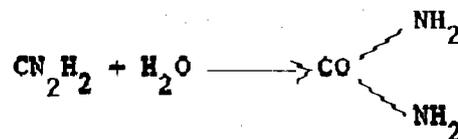
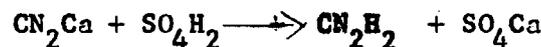
La première synthèse a été réalisée par WOLHER (1928) puis elle a été fabriquée industriellement après les recherches de MATIGNON (1922) par décomposition, à 150° et sous pression, du carbonate d'ammonium.



Ce carbamate résulte de la réaction suivante :



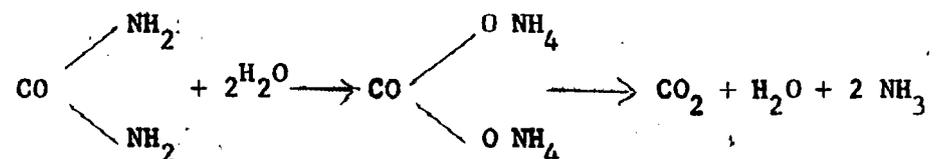
Actuellement on l'obtient également à partir de l'action de l'acide sulfurique sur la cyanamide calcique :



De ces diverses réactions il résulte un sel blanc cristallisé contenant 46 % d'azote uréique. Il se présente sous forme de granulés car il est enrobé par un produit inerte et dénommé Perluré. Cet engrais ne doit pas contenir plus de 1 % de buyret, substance toxique pour les plantes.

### 2) - Evolution dans le sol

Dans le sol, sous l'influence de l'uréase, il se produit une hydratation.



Cependant en présence d'une faible activité microbienne, on peut rencontrer une toxicité due à l'urée non décomposée (COURT et AL. 1964) A l'opposé une forte libération de NH<sub>3</sub> peut se produire et dans les sols à pH supérieur à 7, cette accumulation peut être également toxique en empêchant l'oxydation des nitrites.

En résumé, il existe donc plusieurs causes de phytotoxicité en fonction de l'écologie et de la biologie du sol et une étude récente de DURAND (1965) définit les conditions d'action de l'Uréase en fonction des caractéristiques du sol.

### 3 - Emploi

Outre l'utilisation classique en engrais solides sa forte solubilité dans l'eau permet son usage en irrigations fertilisantes. D'autre part la fumure foliaire surtout économique si elle est combinée à un traitement herbicide, est possible avec tous les produits phytosanitaires sauf les mélanges sulfocalciques ; cependant sauf pour le blé et la betterave, plants pouvant supporter des concentrations assez fortes, l'utilisation de l'urée correspond seulement à un moyen très efficace pour assurer un complément de fumure azotée.

D - Ammoniac anhydre obtenu par liquéfaction de l'ammoniac, ces caractéristiques sont les suivantes :

#### 1)- Propriétés physiques

82% Azote

Il s'agit d'un gaz incolore plus léger que l'air ( 0,771 g/litre à 0°C). Il se liquéfie à la pression atmosphérique à - 33,4°. Dans les réservoirs la phase liquide est toujours en équilibre avec la phase gazeuse dont la pression varie avec la température (à 50°C cette pression est de 20 bars). Le gaz ammoniac est très avide d'eau, il se dissout en formant  $\text{NH}_4\text{OH}$ , sa dissolution est toutefois limitée par la tension de vapeur de l'ammoniac.

#### 2)- Propriétés chimiques

Gaz non inflammable sauf s'il est mélangé à l'air dans des proportions de 16 à 25 %, il n'attaque pas les métaux mais  $\text{NH}_4\text{OH}$  attaque le Cu, le Zn et l'aluminium. A de très faibles concentrations 400 à 700 ppm  $\text{NH}_3$  il irrite les muqueuses et à des doses plus élevées on peut constater une toxicité mortelle.

#### 3)- Comportement dans le sol :

- Diffusion : A la sortie de la dent d'injection  $\text{NH}_3$  diffuse de part et d'autre, pour une humidité donnée du sol, la vitesse de cette diffusion dépend du volume d'air du sol ; à titre d'exemple cette diffusion s'étend à 25 cm en 8 H avec 40 % d'air en volume et en 6 H 1/2 avec 50 %

- Fixation : Dans le sol  $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_4 + \text{OH}^-$  avec en sol acide fixation préférentielle sur les argiles et en sol calcaire sur la matière organique.

L'ion  $\text{NH}_4$  de diamètre correspondant à 2,86 Å sera fixé en fonction des types d'argiles et cette fixation soumise à l'influence des variations de dessiccation et d'humectation sur l'espace interfoliaire.

$\text{NH}_3$  peut être fixé sur les colloïdes humiques ou d'autres composés tels que la lignine. Dans un Mor épais on peut constater une variation de la teneur en azote de 1,75 à 2,78 % par injection de 200 kg de  $\text{NH}_3$  hectare ; le C/N varie de 32 à 24 entraînant une augmentation de 42 % de la production de  $\text{CO}_2$  et de 20 à 25 % de la production forestière.

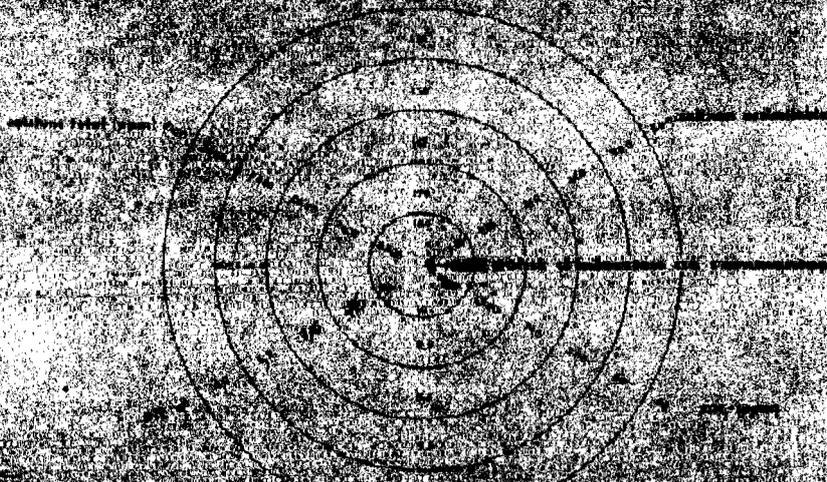
- Action sur la structure :  $\text{NH}_3$  affecte défavorablement mais pendant une courte durée la stabilité structurale en matière organique ; cependant une meilleure diffusion de la matière organique dans les agrégats apporterait, à plus longue échéance, une amélioration plus stable de la structure.

- Action sur le pH : Aussitôt l'injection, l'augmentation de pH peut atteindre 2 unités mais cette élévation temporaire est rapidement remplacée par l'action acidifiante des ions  $\text{NH}_4$ .

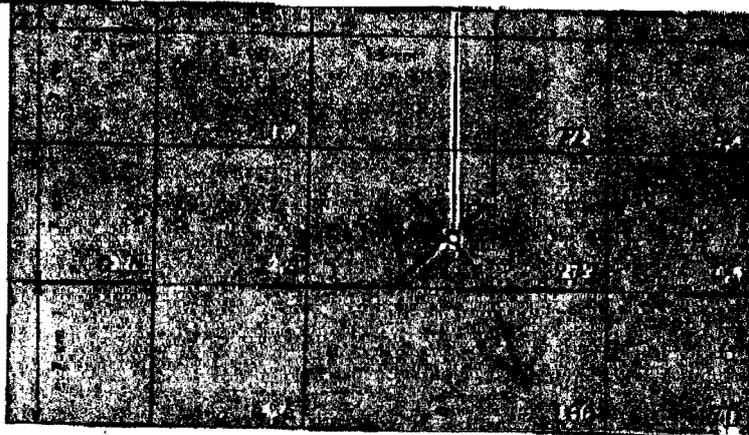
- Action sur l'assimilabilité des autres éléments : Les modifications de pH interviennent sur la solubilisation et l'assimilation de certains éléments ; d'autre part, l'action dissolvante et hydrolytique sur la matière organique libère des éléments assimilables.

Effet de l'ammoniac injecté à la dose de 110 kg de N/ha, avec des dents injectrices espacées de 1 m. Les mesures ont été faites 8 semaines après l'application. Chaque anneau représente 2,5 cm.

(Extrait de Anhydrous Ammonia Hand Book)



Diffusion de l'ammoniac en sol de limon. Dose 100 N/ha avec des dents injectrices espacées de 50 cm. (Résultat d'essais effectués par M. Flon, Directeur de la station agronomique de Seine-et-Marne à Melun). Les nombres indiquent la teneur en ammoniac en mg de  $\text{NH}_3$ /kg de sol, 24 heures après l'injection. La diffusion latérale ne dépasse guère 10 cm, à partir du point d'injection. On notera cependant une diffusion importante dans la partie inférieure droite de la coupe, due à une fissure résultant du labour.



- Action sur la microfaune et la microflore :

- effet toxique sur la faune dans la zone d'injection (nématodes - taupins - lombrics).

- sur la microflore on constate pendant deux à trois jours une réduction des bactéries et champignons cependant après une dizaine de jours on assiste à une augmentation du nombre des bactéries.

- Nitrification : La vitesse de nitrification est sensiblement la même que celle de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ . Cependant pour sols à pH neutres et alcalins cette nitrification commence par la zone la plus éloignée du point d'injection. Dans des conditions normales on estime que la nitrification est terminée dans un délai d'environ six semaines.

4) - Utilisation

Il existe toute une chaîne de distribution adaptée à ce mode de fertilisation et plusieurs diapositives vous indiqueront les résultats et la tendance actuelle de l'emploi de cette forme de fertilisation.

E - Crud ammoniac

Sous produit de la fabrication de gaz d'éclairage, ce produit pulvérulent renfermant de nombreux granulés gris vert, bleu foncé (ferrocyanure-bleu de Prusse) mais également des composés cyanurés qui l'ont fait employer comme insecticide et herbicide. De toutes façons il faut l'utiliser deux mois avant le semis en terre perméable et profonde.

**IV - ENGRAIS NITRIQUES**

A - Nitrate de soude :  $\text{NaNO}_3$

1) - Préparation :

Naturel : Provenant d'éruption volcanique, de décharge électrique ou plus vraisemblablement de la minéralisation d'algues marines ou d'excréments d'oiseaux marins (Guano). En présence de calcaire il se produit du  $2 \text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  qui sous l'influence de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  de l'eau de mer, donne  $\text{NaNO}_3 + \text{CaSO}_4$  un gisement de minéral dénommé "caliche" se trouve en grande quantité au Chili où il est dissout puis recristallisé pour épuration.

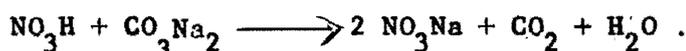
Synthèse : La préparation de  $\text{NO}_3\text{H}$  de synthèse s'effectue soit par le procédé Norvégien correspondant à l'oxydation de N vers 3 000 à 3 500°.



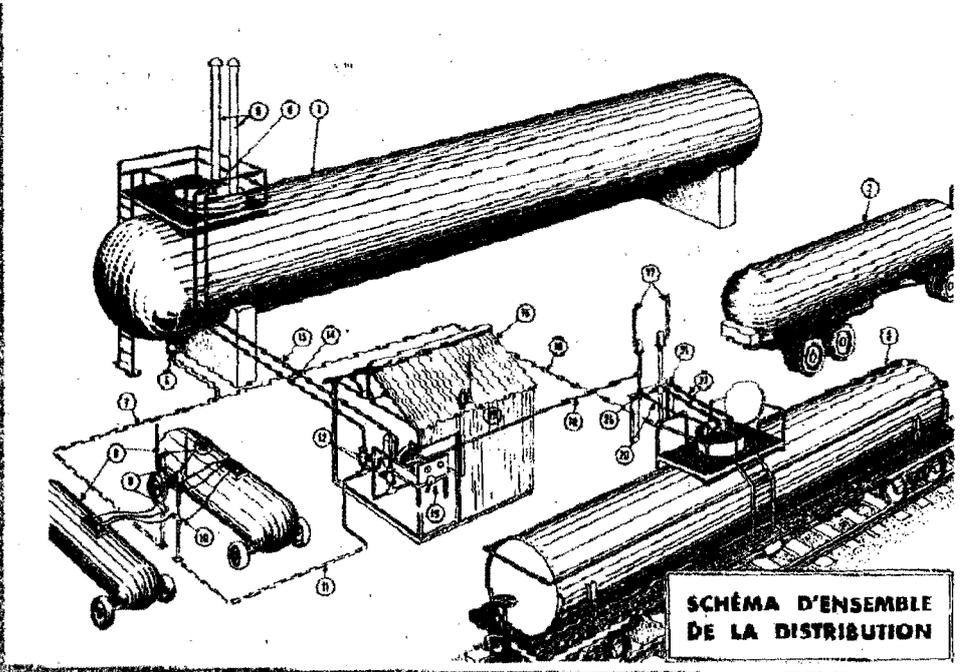
l'oxyde azotique mis en présence d'air et d'eau à basse température se transforme en  $\text{NO}_2\text{H}$  et  $\text{NO}_3\text{H}$ .

On utilise également la combustion du gaz ammoniac de synthèse avec le contact de l'air sur platine chauffée au rouge.

$4 \text{NH}_3 + 5 \text{O}_2 \longrightarrow 4 \text{NO} + 6 \text{H}_2\text{O}$  puis oxydation, et enfin action sur le carbonate de sodium :



Une concentration ultérieure et la cristillation donne<sup>nt</sup> un produit contenant **16 % de N.**



elles sont injectées.

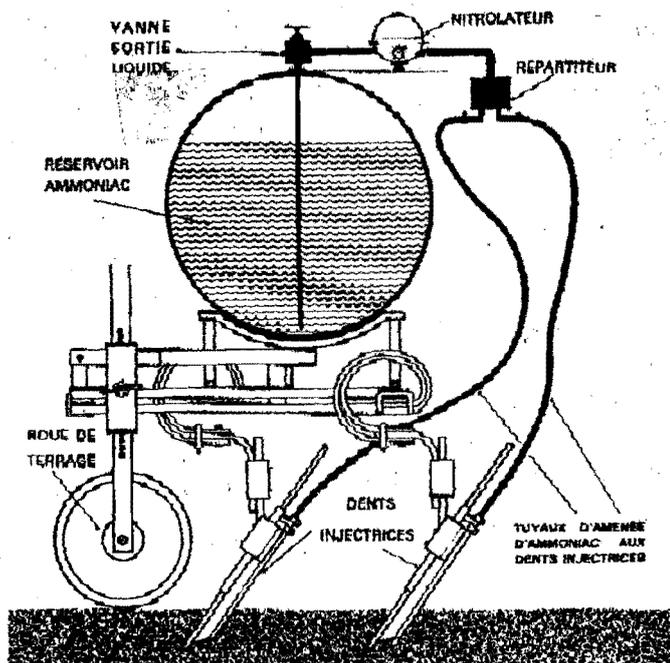
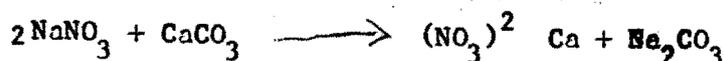


Schéma type d'un applicateur d'ammoniac

## 2) Evolution dans le sol

Très hygroscopique, donc très soluble cette qualité très appréciable peut entraîner quelques ennuis s'il existe une répartition <sup>ir</sup> régulière, en effet, un bloc isolé absorbe l'humidité et produit une solution concentrée laquelle fera tâche et attirera l'humidité en desséchant le sol autour d'elle; si le semis est effectué à ce moment, les graines tombant dans les zones humides germeront mal (toxicité) et dans les zones sèches il y aura également un mauvais développement.

Dans le sol  $\text{NaNO}_3$  se transforme, en effet, la soude rencontre des bases qui la déplacent :



Il ne faut jamais épandre cet engrais lorsque les plantes sont mouillées car il existe des risques de brûlures.

### B - Nitrate de chaux

#### 1) - Préparation

Le plus ancien des engrais synthétiques (1905, en Norvège) résulte de l'action de l'acide nitrique sur du calcaire, on recueille une solution de nitrates de chaux qui, après neutralisation par un lait de chaux est concentrée.

#### 2) - Evolution dans le sol

Cet engrais permet de donner un coup de fouet par son action rapide ; il convient :

- Au printemps, avant la minéralisation et,
- En été car très hygroscopique, une simple rosée le rend assimilable. D'autre part il correspond à l'engrais des retardataires ou des conditions météorologiques défavorables, enfin il s'agit d'un engrais de précision permettant par des épandages répétés et calculés des rendements records.

## V - ENGRAIS AMMONIACO-NITRIQUES

#### 1)- Préparation

Obtenus par neutralisation de l'ammoniaque par l'acide nitrique suivi d'un enrobage par une plus ou moins grande quantité de matière inerte.

#### 2)- Evolution dans le sol

Il permet de réunir les avantages et inconvénients des formes précédentes. Au point de vue économique, il est recommandé d'utiliser les formes à hauts dosages.

## VI - EVOLUTION DE LA FUMURE AZOTEE EN FRANCE

Au cours des dernières années la progression de la consommation des engrais azotés a été nettement plus importante que celle des engrais phosphatés et potassiques. Néanmoins cette progression varie en fonction des régions. Celle-ci est particulièrement élevée dans les régions " nettement en retard " et dans celles où les céréales prédominent. Ailleurs c'est la prédominance de la vigne, et surtout des prairies, qui a limité le développement de la fumure azotée en pourcentage et en tonnage.

### Production de produits azotés (tous usages)

	en milliers de tonnes d'azote	
	1964-65	1967-68
Sulfate d'ammoniaque .....	88	75,7
Cyanamide calcoique .....	2,7	3,3
Urée.....	90,4	92,1
Engrais simples en solution.....	11,2	43,2
Ammoniac nitrojection .....	7,4	15,4
Nitrate de soude .....	1,1	0,8
Nitrate de chaux .....	35,2	21,3
Ammonitrates.....	555,4	620,5
Nitrate d'ammoniaque et solutions azotées .....	78,6	73,5
Autres produits azotés destinés aux fabricants d'engrais composés.....	225,7	349,6
Autres produits azotés destinés aux usages industriels .....	109,2	131
<b>TOTAL .....</b>	<b>1.204,9</b>	<b>1.426,4</b>

### Prix de vente de l'unité d'azote à la production (marchandise nue, franco, hors taxes)

	1964-65	1967-68
	F/KN	F/KN
Sulfate d'ammoniaque 21% .....	1,23	1,18
Nitrate de chaux 15,5% .....	1,60	1,51
Nitrate de soude .....	1,74	1,81
Ammonitrate 22% .....	1,13	1,06
Ammonitrate 27,5% .....	1,06	1,04
Ammonitrate 33,5% .....	1,03	1,02
Nitrate d'ammoniaque 34,5% .....	1	0,99
Urée.....	1,04	1,03

**Livraisons d'engrais azotés simples aux distributeurs en culture et de matières premières aux fabricants d'engrais composés sur le marché intérieur**

Produits azotés de production française	en milliers de tonnes d'azote	
	1964-65	1967-68
Sulfate d'ammoniaque .....	42,8	46,2
Cyanamide calcique .....	2,5	3,1
Urée.....	23,5	22,6
Engrais simples en solution.....	10,5	42,4
Ammoniac nitrojection .....	7,4	15,4
Nitrate de soude .....		
Nitrate de chaux .....	24,3	22
Ammonitrates.....	460,1	507,7
Nitrate d'ammoniaque et solutions azotées .....	50,1	38,2
Autres produits azotés destinés aux fabricants d'engrais composés.....	225,7	349,6
<b>TOTAL.....</b>	<b>846,9</b>	<b>1.047,2</b>

**Prix moyen de vente de l'unité d'azote aux agriculteurs  
(marchandise logée, franco, taxes comprises)**

Sulfate d'ammoniaque 21% en sac jute occasion.....	1,56	1,46
Nitrate de chaux 15,5% en sac papier imperméabilisé	1,94	1,88
Nitrate de soude 16% en sac jute occasion .....	2,19	2,20
Ammonitrate 22% en sac papier imperméabilisé .....	1,45	1,32
Ammonitrate 33,5% en sac papier imperméabilisé ...	1,30	1,24
Urée 46% en sac papier imperméabilisé.....	1,30	1,24
<b>Prix moyen du kilo d'azote après pondération par les quantités vendues à usage agricole .....</b>	<b>1,37</b>	<b>1,28</b>



Circonscriptions et Départements	Azote dans les engrais simples et composés	
	1964-65	1967-68
<b>17. Bourgogne</b> .....	38.924	51.572
Côte-d'Or .....	13.415	18.167
Nièvre .....	5.515	6.526
Saône-et-Loire .....	5.167	6.916
Yonne .....	14.827	19.963
<b>18. Auvergne</b> .....	8.988	14.754
Allier .....	5.004	7.110
Cantal .....	637	1.189
Haute-Loire .....	827	1.484
Puy-de-Dôme .....	2.520	4.971
<b>19. Rhône-Alpes</b> .....	24.675	37.431
Ain .....	5.307	8.464
Ardèche .....	1.267	2.111
Drôme .....	5.597	7.792
Isère .....	6.828	10.802
Loire .....	1.821	2.949
Rhône .....	2.523	3.182
Savoie .....	532	820
Haute-Savoie .....	800	1.311
<b>20. Languedoc</b> .....	20.521	29.217
Aude .....	7.107	9.443
Gard .....	4.826	7.016
Hérault .....	4.441	6.596
Lozère .....	174	409
Pyrénées-Orientales .....	3.973	5.753
<b>21. Provence-Corse</b> .....	23.474	29.542
Basses-Alpes .....	2.749	3.282
Hautes-Alpes .....	719	967
Alpes-Maritimes .....	1.993	1.792
Bouches-du-Rhône .....	9.697	12.185
Corse .....	510	1.036
Var .....	1.900	2.057
Vaucluse .....	5.906	8.223
<b>FRANCE</b> .....	<b>847.197</b>	<b>1.101.838</b>

TABLEAU IX

Données relatives à la fumure dans les vingt et une régions de programme

Régions de programme	Part dans la consommation d'azote		Evolution de la con- sommation Indice base 100 en 1964-65 (3)	Niveaux moyens de la fumure en 1967-68 kg d'éléments fertilisants/ha			
	1964-65 (1)	1967-68 (2)		N (4)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (5)	K <sub>2</sub> O (6)	Total (7)
<b>Nord</b> .....	6,5	7	140	79,5	72	77,9	229,4
<b>Picardie</b> .....	10,5	9,7	120	75,4	81,6	76	233
<b>Région Parisienne</b> .....	6,1	5,7	120	87,8	102,1	89,5	279,4
<b>Centre</b> .....	15,8	14,3	116	61,2	69	49,2	179,4
<b>Hte-Normandie</b> .....	4,1	4,1	130	52,7	72,7	59,5	184,9
<b>Bse-Normandie</b> .....	2,3	2,4	138	18,7	50,4	31,2	100,3
<b>Bretagne</b> .....	6	6	130	33,9	62,2	40,7	136,8
<b>Pays de la Loire</b> .....	5,3	5,5	134	23,3	49,9	37,1	110,3
<b>Poitou-Charente</b> .....	5,1	5,4	138	31,1	48,5	28,8	108,4
<b>Limousin</b> .....	0,8	0,8	130	10,5	34,6	10,2	55,3
<b>Aquitaine</b> .....	5,7	6,3	144	46,5	54,2	41,2	141,9
<b>Midi-Pyrénées</b> .....	6	6,6	142	30,5	38,2	18,2	86,9
<b>Champagne</b> .....	8,2	7,8	124	56,3	76,1	67,5	199,9
<b>Lorraine</b> .....	2	2,1	140	18,2	30,1	16,7	65
<b>Alsace</b> .....	1,1	1	118	24,2	30,3	32,1	86,6
<b>Franche-Comté</b> .....	0,7	0,6	111	9,7	26,6	16,1	52,3
<b>Bourgogne</b> .....	4,6	4,7	132	34,3	49,3	33,2	116,8
<b>Auvergne</b> .....	1,1	1,3	164	10,2	23	8,3	41,5
<b>Rhône-Alpes</b> .....	2,9	3,4	152	21,8	37,4	28,6	87,8
<b>Languedoc</b> .....	2,4	2,6	142	29,2	27,3	43,9	100,4
<b>Provence</b> .....	2,8	2,7	126	34,4	39,6	46,4	120,4
<b>FRANCE</b> .....	100	100	130	37,2	51,8	39,2	128,2

IVème - P A R T I E

F E R T I L I S A T I O N P H O S P H A T E E

- CHAPITRE I - PHOSPHORE et PLANTE
- II - PHOSPHORE et SOL
- III - ETUDE de la DYNAMIQUE du PHOSPHORE dans le SOL
- IV - DIAGNOSTIC USUEL des BESOINS EN PHOSPHORE
- V - ENGRAIS PHOSPHATES

## IV° - PARTIE : FERTILISATION PHOSPHATÉE

### CHAPITRE I : PHOSPHORE ET PLANTE

#### I - ROLE PHYSIOLOGIQUE DU PHOSPHORE

Celui-ci peut se subdiviser en trois aspects principaux :

- A- Le phosphore entre dans la constitution de nombreux composés parmi lesquels certains sont particulièrement importants.
- composés minéraux ; phosphates alcalins et alcalino-terreux tels que phosphate de Ca à l'état solide dans les globules des grains d'aleurone de l'albumen de certaines graines.
  - composés organiques constitués surtout par des esters de  $PO_4H_3$
  - Glucides phosphorés : esters de sucres  
esters de l'inositol ( phytine)
  - Lipides phosphorés : Phosphoaminolipides ( lecithine)
  - Protéides phosphorés : Phosphoprotéides - nucléoprotéides
  - Constituants de certaines enzymes - Carboxylase et certaines déshydrases.

Si dans les cellules les lecithines et nucléoprotéides jouent un rôle plastique essentiel ( constituant du noyau et du cytoplasme) les phosphates minéraux s'accumulent surtout dans le suc vacuolaire et interviennent principalement dans la régulation de la pression osmotique et du pH. On peut donc prévoir que le phosphore sera surtout présent dans les graines ( phytine) et dans les cellules à activité physiologique intense ( embryons, méristème).

B- Le phosphore participe à un grand nombre de réactions biochimiques

C'est ainsi que la respiration et l'ensemble du métabolisme des glucides s'effectuent par l'intermédiaire de composés phosphorylés ( hexoses phosphatés par exemple).

C- Les ions phosphoriques servent de transporteurs d'énergie

L'énergie produite par la respiration animale ou végétale, est en quelque sorte stockée dans les combinaisons phosphoriques, pour être utilisée ensuite aux réactions de synthèse. D'autre part, il semble bien que l'acide phosphorique soit le principal agent susceptible de recevoir l'énergie lumineuse captée par les chloroplastes jouant ainsi un rôle capital dans la photosynthèse ; ARNON va même jusqu'à affirmer que dans la photosynthèse le métabolisme du phosphore est plus important que celui du carbone.

#### II - BESOINS DES PLANTES EN PHOSPHORE -(BLANCHET , 1964)

Cette question extrêmement importante peut se scinder en plusieurs parties :

A- Absorption

Les besoins alimentaires correspondent à la quantité du P contenu dans l'ensemble des organes des plantes lorsque ces dernières sont cultivées.

dans un milieu assurant une nutrition phosphatée optimum ; en effet, au cours de l'absorption on ne rencontre pas de phénomène de surconsommation, ou consommation de luxe, comme pour la nutrition potassique. Cependant de nombreux facteurs sont susceptibles de faire varier les teneurs en P des végétaux ( climat, conditions culturales), aussi les différentes données publiées par BLANCHET ( 1964) ne sont que des valeurs moyennes toujours susceptibles de révision.

#### CULTURES - CEREALES et OLEAGINEUX

	Par quintal de grains produit, kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
	Besoins	Exportations
Blé	1,45	0,9
Orge	1,35	0,85
Avoine	1,4	0,85
Maïs	1,3	0,8
Colza	4	1,7
Tournesol	3,2	1,6

#### PLANTES SARCLES

	Par tonne de racines ou tubercules kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
	Besoins	Exportations
Pommes de terre	1,85	1,25
Betteraves sucrières	1,85	1,1
Betteraves fourragères ( 15% mat. sèche)	1,15	0,75

#### FOURRAGES, EXPLOITATION PAR FAUCHE

	kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> par tonne de foin
Luzerne .....	9,5
Trèfle violet ....	8,
Ray-grass italien	7,5
Prairie temporaire (moyenne) .....	8,
Maïs .....	5,5

**TENEUR EN PHOSPHORE DES PRINCIPALES PLANTES CULTIVEES**  
 ( P en pour cent de la matière sèche)  
 ( d'après R. GERVY, 1970)

**CEREALES :**

Blé	: plante entière à la floraison	0,45	+15%
	grain	0,45	"
	paille	0,09	"
Orge	: plante entière à la floraison	0,4	"
	grain	0,45	"
	paille	0,17	"
Avoine	: plante entière à la floraison	0,5	"
	grain	0,45	"
	paille	0,16	"
Seigle	: grain	0,45	"
Maïs	: plante entière à la floraison	0,35	"
	grain	0,40	"
Riz	: grain total	0,35	"
	grain poli	0,20	"

**LEGUMES :**

Asperges	: tige	0,9	"
chou-fleur	: fleur	0,85	"
Lentille	: grain	0,5	"
Haricot	: grain	0,6	"
	feuille	0,35	"
Pois	: grain	0,6	"
	feuille	0,35	"
Epinard	: feuille	0,4	"
Endive	: feuille	0,8	"
Cresson	: feuille	0,7	"
Laitue	: feuille	0,6	"
Tomate	: fruit	0,65	"
Oignon	: bulbe	0,55	"
Ail	: bulbe	0,45	"
Radis rose	: racine	0,55	"
Navet	: racine	0,75	"
Champignon de couche		1,15	"
Céleri	: pétiole	0,65	"

**PLANTES RACINES :**

- Pomme de terre	: plante entière à la floraison	0,5	+15%
	tubercules	0,20	"
Betteraves	: feuilles et collets	0,85	"
	sucrière racines	0,25	"
Topinambour	: tubercules	0,15	"

**PLANTES INDUSTRIELLES :**

- Tabac	: plante entière à la floraison	0,40	"
Colza	" "	0,60	"
Soja	" "	0,30	"
	grain	0,70	"
Oeillette	: plante entière à la floraison	0,60	"
Lin	: " "	0,30	"

**PLANTES FOURRAGERES :**

- Trèfle violet	: plante entière à la floraison	0,35	"
Trèfle blanc	:		
Lotier	: "	0,40	"
Luzerne-Vesce	: "	0,45	"
Sainfoin	: "	0,35	"
Maïs-fourrage	: à la récolte	0,2	"
foin de prairies	: bonne qualité	0,25	et +
	qualité moyenne	0,2	± 10%
	mauvaise	inférieure à 0,18	

**QUELQUES PLANTES DIVERSES - Pour mémoire -**

Plantain lancéolé	: environ	0,4
Senegon	: "	0,6
Pissenlit	: "	0,35
Ortie	: "	0,7

La teneur en phosphore devra donc être régulièrement assortie de précisions indiquant l'âge et le stade physiologique du végétal au moment du prélèvement. En matière de diagnostic foliaire, il devient même indispensable de préciser la place des feuilles analysées.

### B - Quantités exportées et restituées

Il appartient à chaque agriculteur d'estimer la part de restitution au sol des résidus de récoltes lorsque cette part n'est pas évidente et également d'apprécier à l'échelle de l'exploitation leur répartition entre les différentes parcelles.

### C - Phase critique d'absorption

L'intensité des besoins des plantes varie en outre selon le stade végétatif. Ces besoins sont particulièrement élevés chez les plantes jeunes, très riches en phosphore. Les jeunes céréales, par exemple, accumulent des quantités relativement élevées d'acide phosphorique, qui sont utilisées au cours de la croissance. La richesse phosphorique du sol facilite l'implantation des cultures et constitue souvent un facteur de précocité, ce phosphore, en effet, favorise un bon développement des racines et corrige le retard à la maturité en cas d'excès d'azote.

Pour les céréales l'augmentation de rendement porte plus sur les graines que sur la paille et résulte davantage d'une multiplication du nombre de grains que de l'augmentation du poids moyen en raison d'une action favorable du phosphore sur la fécondation et la production des graines.

D - Le rythme de l'absorption du phosphore doit, en effet, suivre celui de la croissance, notamment lorsque celle-ci est très active ; ainsi les déficiences phosphoriques se manifestent surtout au cours des "périodes critiques" de la nutrition minérale, par exemple montaison et épiaison des céréales. Le niveau des réserves du sol doit donc être suffisant pour assurer un rythme d'alimentation compatible avec la croissance active des plantes au cours de leurs périodes de développement les plus intenses. Il est donc possible d'observer dans des sols riches, un effet peu marqué mais significatif, des engrais phosphatés solubles sur le rendement des cultures légumières à croissance très rapide.

**III - ALIMENTATION PHOSPHATEE DES PLANTES**

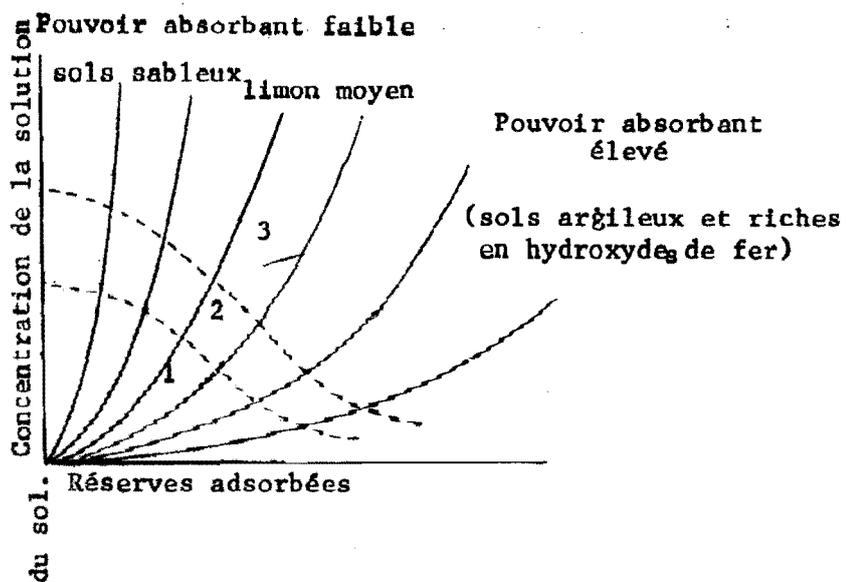
On a longtemps pensé que les plantes s'alimentaient dans la solution du sol de la même façon que dans une solution nutritive constamment renouvelée. Cette conception est critiquable car de nombreuses terres, fournissant des rendements élevés, présentent en effet des concentrations en phosphore de leurs solutions notoirement insuffisantes pour une culture en milieu liquide. La solution "moyenne" du sol, telle qu'on l'extrait habituellement, ne peut être considérée comme la seule source de P à partir de laquelle les plantes puissent s'alimenter, en particulier dans les sols à pouvoir absorbant élevé ; cette concentration en P des solutions du sol donne plutôt une indication du degré de saturation en phosphore des colloïdes absorbants.

A titre d'exemple BLANCHET (1967) indique qu'une culture d'orge utilise, en climat tempéré, sur l'ensemble de sa végétation environ 300 mm d'eau soit 3 000 T/ha ; la solution du sol renferme une teneur moyenne en P de 0,2 mg par litre, l'absorption des 3 000 T d'eau apporte au contact des racines 0,6 kg de phosphore. Or la quantité totale de P absorbée par la culture est de l'ordre de 20 à 25 kg. La plante a donc dû concentrer le phosphore, par rapport à la solution du sol, trente à quarante fois. De toutes façons la concentration de la solution de sol en P est très faible 0,2 à 0,6 mg par litre, les extrêmes se situant entre 0,1 et 1,5 mg par litre.

Les rapports P en solution / P absorbé varient largement selon les sols et sont réglés par le pouvoir absorbant du sol ; celui-ci représentant la capacité totale de rétention des ions phosphoriques sous forme mobile. Dès 1953, BOISCHOT définissait une concentration d'équilibre de la solution, concentration d'autant plus faible que le pouvoir absorbant est plus élevé.

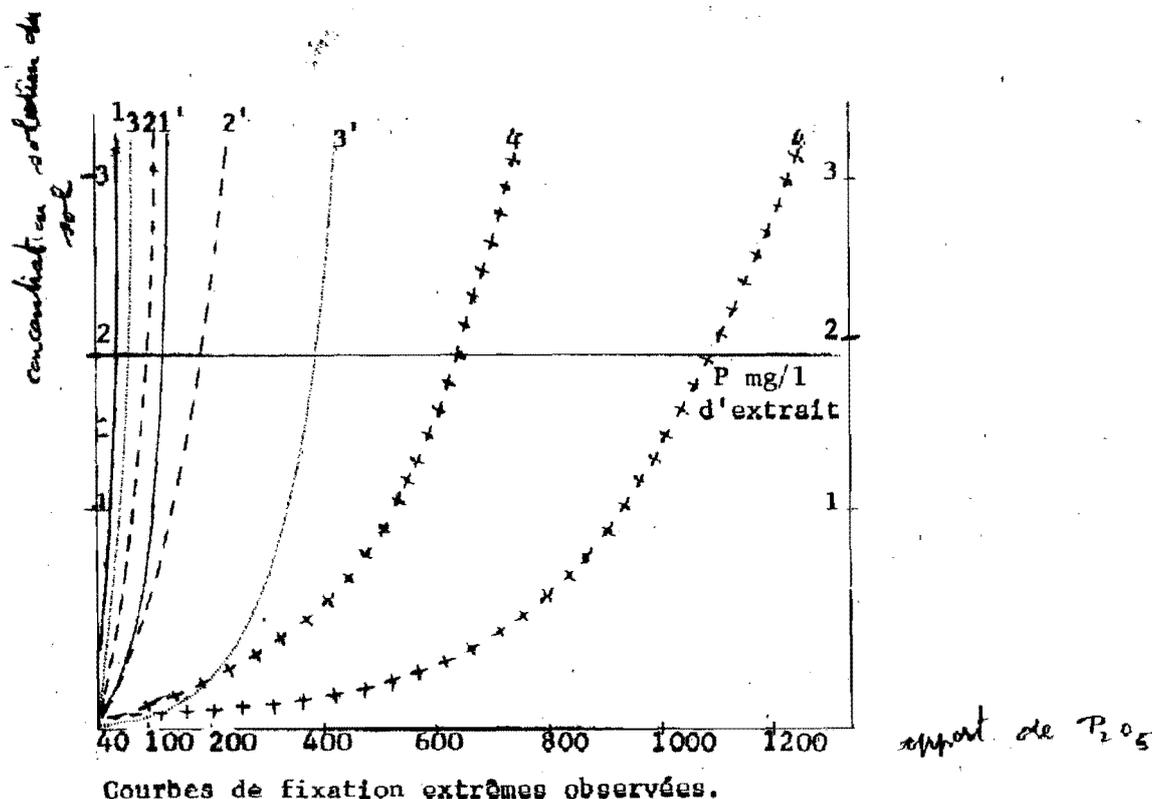
Un bon sol de limon dont la teneur en  $P_2O_5$  serait de 0,30% renfermerait sensiblement 1 200 kg de  $P_2O_5$  par hectare ; or la concentration moyenne de la solution du sol voisine 0,5 kg/ha et les besoins d'une culture nécessitant 70-75 kg de  $P_2O_5$  correspondent à 150 fois la quantité du P en solution et 6 % de l'ensemble des réserves.

Mais l'alimentation n'est pas non plus une fonction définie de la quantité d'ions  $PO_4$  adsorbés que l'on évalue habituellement par le dosage des réserves dites "assimilables". Selon la nature des sols, une même réserve représente en effet des pouvoirs alimentaires différents, dépendant du pouvoir absorbant et de la mobilité des ions. Il existe entre ces divers facteurs, des relations comme l'indique le schéma ci-après (BLANCHET 1964)



L'auteur représente les concentrations des solutions du sol obtenues dans divers types de terres en fonction de réserves adsorbées croissantes. On peut considérer sur le schéma précédent diverses zones correspondant à des pouvoirs alimentaires, faible, moyen, élevé. Une même quantité de réserves adsorbées correspond à un pouvoir alimentaire d'autant plus élevé que la concentration de la solution est plus forte (pouvoir adsorbant faible) et réciproquement.

GACHON (1966) dans un même ordre d'idées, indique les courbes de fixation observées pour différents types de sols.



- l'absorption par l'élément adsorbé*
- |     |           |  |
|-----|-----------|--|
| 1-1 | —————     | soils détritiques                          |
| 2-2 | - - - - - | soils argilo-calcaires                     |
| 3-3 | .....     | soils cristallins                          |
| 4-4 | +++++     | soils volcaniques ou humifères de montagne |

L'ensemble de ces variations nous entraîne donc à étudier plus en détail la dynamique du phosphore dans le sol.

## CHAPITRE II-PHOSPHORE ET SOL

De très larges extraits de ce chapitre proviennent des travaux de BLANCHET (1959 à 1966) et du précis de Pédologie de DUCHAUFOR (1970).

### I - FORMES DU PHOSPHORE DANS LE SOL

#### A - Phosphore cristallin

Si la décomposition des minéraux sous nos climats tempérés libère en très faible quantité du P assimilable à l'inverse certaines roches calcaires peuvent contenir jusqu'à 15 tonnes de  $P_2O_5$  par hectare et se montrer déficientes en cet élément vis à vis de la nutrition végétale.

#### B - Forme organique

Au point de vue quantitatif cette forme peut atteindre 50 % du phosphore total. Le phosphore existe dans la matière organique et dans l'humus, sous des formes diverses (nucléoprotéines, lécithines, phytines etc..) On observe une minéralisation lente du phosphore organique, mais cette minéralisation ne se produit que si la matière organique fraîche est assez riche en P, sinon, les micro-organismes utilisent la totalité du phosphore présent pour leurs propres synthèses. On admet que le rapport C/P doit être inférieur à 200 pour la minéralisation, dans le cas inverse on constate une réorganisation. D'autre part, la libération du phosphore organique est lente, dans les sols à faible activité biologique (Mor, certains Moder acides), alors qu'elle est rapide dans les humus biologiquement actifs (Mull). De toutes façons cette minéralisation reste plus faible que celle de l'azote et un mull très actif peut libérer de l'ordre de 3 mg de phosphore par 100 g de sol en 70 jours.

#### C - Ions phosphoriques échangeables, adsorbés ou autodiffusibles

Cette fraction du phosphore joue un rôle particulièrement important dans l'alimentation des végétaux. Plusieurs constituants minéraux du sol possèdent un pouvoir adsorbant élevé à l'égard des ions  $PO_4$ , citons les argiles, les hydroxydes métalliques, le calcaire et les composés humiques. Porteurs de charges électriques négatives, les ions  $PO_4$  du système solution-colloïdes du sol sont énergiquement adsorbés à la surface de la phase solide grâce aux charges d'ions constitutifs des colloïdes ou des cations adsorbés.

Les ions phosphoriques adsorbés sont en agitation continuelle dans les sols humides ; cette agitation thermique correspond à des mouvements spontanés et non orientés de diffusion dans tout l'espace occupé par l'eau libre et non libre du sol. Les expériences de BARBIER et col. (1954 et 1956) ont montré qu'il existait un échange permanent entre les ions retenus par les colloïdes du sol et les ions  $PO_4$  en solution. Ainsi les ions  $PO_4$  contenus dans la solution du sol ou retenus par l'un quelconque des adsorbants sont absolument indiscernables ils forment ce que l'on appelle le " pool " des ions  $PO_4$  à partir desquels la plante s'alimente. Cette forme peut être opposée à la forme insoluble résultant des phénomènes de précipitation ou de fixation par les colloïdes du sol bien que ces deux processus ne soient pas complètement irréversibles.

En raison de l'importance de l'énergie d'adsorption des surfaces colloïdales dont le potentiel électrique est toujours élevé, les ions dissous dans la solution ne représentent qu'une fraction minime de l'ensemble des ions mobiles (ordre du centième - LIBOIS 1966). En conséquence les quantités d'ions  $PO_4$  dissous dans l'eau du sol sont d'autant plus élevées que le milieu est plus enrichi en phosphore et d'autant plus diluées que le pouvoir adsorbant du sol est plus grand.

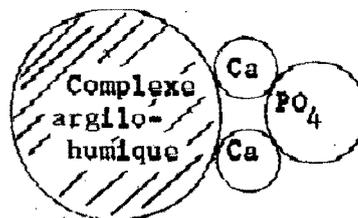
Comme tous les sols sont constitués par un mélange de divers adsorbants nous étudierons l'action de chacun d'eux mais sans oublier que dans la nature il s'établit un équilibre en fonction des divers champs électriques.

### 1) - Fixation par les argiles

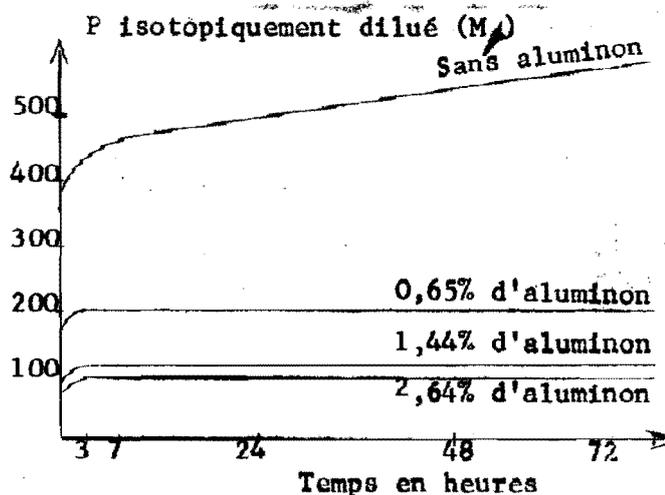
Elle a été étudiée par BARBIER (1954-56) WEY (1956) BLANCHET (1960 à 1966).

a) Fixation aluminique : Celle-ci se produit à la surface du réseau cristallin plus précisément au voisinage des surfaces latérales où les cations  $Al^{3+}$  et  $Fe^{3+}$  des mailles octaédriques voient leurs valeurs partiellement libérées par suite de l'interruption du réseau. WEY a pu montrer pour une montmorillonite - H (pH 4,5) la relation entre les ions adsorbés et le nombre d' $Al^{3+}$  susceptibles de réagir.

b) Fixation calcique : Mise en évidence par BARBIER elle a lieu par l'intermédiaire des bases échangeables retenues à la surface des particules argileuses. Les ions  $Ca^{2+}$  jouent de loin le rôle le plus important ; une argile calcique retenant beaucoup plus d'ions que la même argile saturée en ions alcalins.



BLANCHET a pu montrer la part respective de ces deux éléments dans les phénomènes d'adsorption : si l'on bloque la fonction Al par l'aluminon, on note une réduction considérable de la capacité d'échange de l'argile pour le phosphore ; celle-ci est ramenée à 17 % de la valeur primitive mais "l'autodiffusion" de ces 17 % étudiée à l'aide de P marqué est extrêmement rapide car en une demi-heure l'équilibre avec le phosphore soluble est atteint.



## 2)- Adsorption par les hydroxydes libres (BLANCHET 1960)

Le pouvoir adsorbant des hydroxydes est beaucoup plus élevé que celui de l'argile en raison de leur charge positive : pour  $Fe(OH)_3$  il est de 4 environ et pour  $Al(OH)_3$  23 à 25 %. La vitesse de dilution isotopique est à peu près la même pour ces deux hydroxydes : elle comprend une phase rapide (quelques heures), et une phase lente (3 jours environ). Cependant pour l'alumine une partie du phosphore rétrograde par précipitation ce qui explique les difficultés rencontrées sous climat tropical dans les problèmes de fertilisation phosphatée.

On peut donc souligner le rôle très important des hydrates de fer colloïdaux dans la rétention du phosphore, notamment des hydrates de fer inclus dans les complexes argilo-humiques des mull ou les hydrates de fer libres des sols acides. Demolon a montré qu'il existait une relation étroite entre le pouvoir adsorbant des sols vis à vis de l'ion  $PO_4$  et leur teneur en fer colloïdal.

Quant à l'alumine libre qui caractérise certains sols podzoliques, elle retient le phosphore au même titre que Al échangeable ou Al des feuilletts cristallins, mais sous une forme moins facile à solubiliser. Il existe, en effet une relation nette entre la teneur en Al échangeable des sols acides et l'assimilabilité du phosphore (COLEMAN et al. 1960) ; la libération et l'insolubilisation de Al<sup>+++</sup> échangeable au cours de la podzolisation s'accompagne en même temps d'une certaine " rétrogradation " du phosphore.

En principe, il n'existerait aucune adsorption à la surface des mêmes hydroxydes lorsqu'ils sont à l'état cristallin (gibbsite, goethite) Cependant BACKE (1964) étudiant l'activité des ions  $PO_4$  en présence d'hydroxydes cristallisés et déterminant l'énergie d'adsorption constate que cette dernière revêt trois formes :

- Adsorption physique lorsque l'activité de  $Fe^{3+}$  et  $Al^{3+}$  est faible avec une faible énergie de rétention de  $PO_4$ .
- Adsorption chimique avec une forte énergie en présence d'une certaine quantité de  $Fe^{3+}$  et  $Al^{3+}$ .
- Finalement précipitation si la teneur en  $Fe^{3+}$  et  $Al^{3+}$  est élevée.

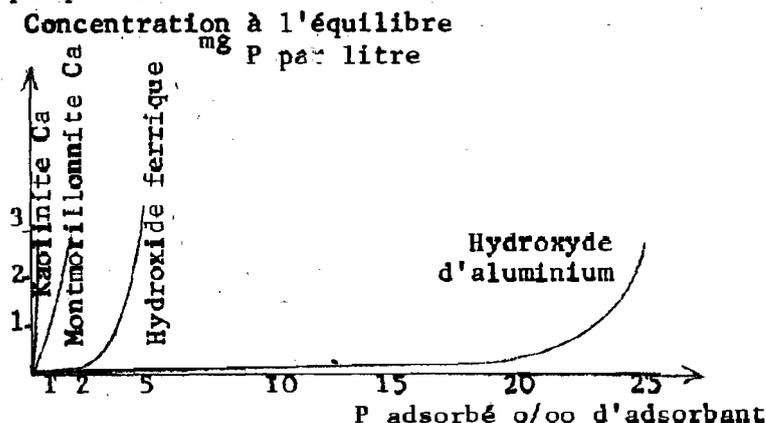
## 3)- Adsorption par le calcaire

En dehors des réactions de précipitation que nous verrons plus loin, le calcaire adsorbe les ions  $PO_4$  ; l'importance de cette fixation est liée à la grosseur des particules c'est-à-dire à l'étendue de leur surface. BOISCHOT et al ont montré qu'un marbre blanc pulvérisé pouvait absorber par gramme de matière 50  $\mu$  de  $P_2O_5$  pour un diamètre des grains de 100 à 150  $\mu$  et 114  $\mu$  pour un diamètre de grains de 75  $\mu$ . La capacité d'échange et la vitesse de dilution isotopique sont semblables à celles des argiles (BLANCHET 1960).

## 4)- Adsorption par les matières humiques

Cette fixation par l'intermédiaire des humates calciques permet d'obtenir une forme de phosphore stable mobile et assimilable. Le rôle de la microflore revêt une très grande importance sur la mobilisation de certaines formes de phosphore TARDIEUX (1966.)

L'ensemble de ces possibilités de fixation peut être résumé par le graphique ci-dessous .



## II - VARIATIONS DE L'ASSIMILABILITE DU PHOSPHORE

A partir des résultats expérimentaux actuels il est possible d'indiquer quelques idées directrices :

- L'assimilabilité maximum correspond aux formes liées à l'argile par le calcium ; la solubilisation est extrêmement rapide.
- Les formes liées au  $CO_2$  Ca actif sont également facilement assimilables dans la mesure où le pH trop élevé n'entraîne pas une rétrogradation apatitique.
- P - Al manifeste une assimilabilité variable et de nombreuses études en cours essaient de délimiter les degrés d'assimilabilité. Il semble toutefois que la forme liée aux argiles soit en grande partie assimilable.

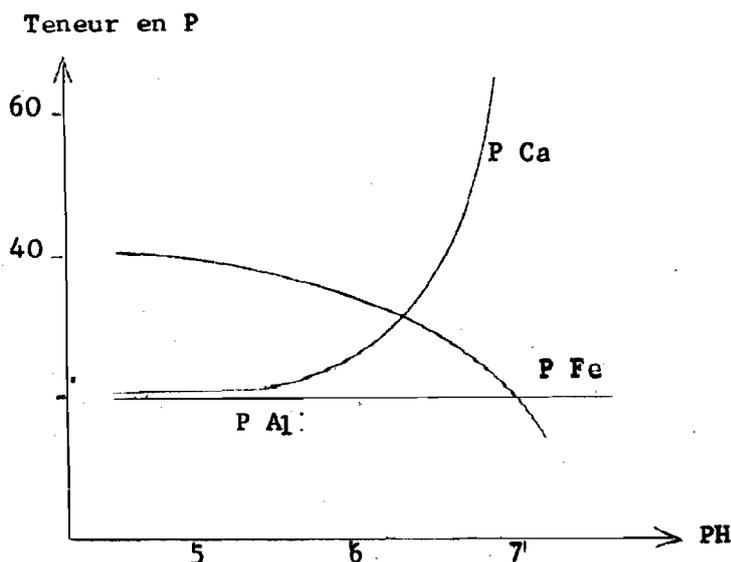
En ce qui concerne l'aluminium échangeable RAGLAND et COLEMAN (1962) par addition de Al (Cl)<sub>3</sub> augmentent l'aluminium échangeable d'un sol et multiplient l'absorption du phosphore par 5 ou 6. Cette assimilabilité accrue du phosphore en milieu acide et en présence d'aluminium échangeable serait à double tranchant : les ions Al entraînés par P s'insolubiliseraient ensuite à la surface des racines (WALLIHAN - 1948) ou seraient précipités à l'intérieur de la plante sous forme de phosphate d'aluminium (WRIGHT 1953) En réalité P serait facilement absorbé mais mal utilisé et il est évident que les plantes acidiphiles s'adaptent beaucoup mieux.

P - Fe - SASPORTES et JACQUIN (1968) ont démontré une analogie partielle quant à l'assimilation du phosphore lié par Al ou Fe avec cependant une répartition différente dans les synthèses organiques.

Il existe toutefois un équilibre entre ces différentes formes, comme le montre l'étude de SCHACHTSCHABEL et HEINEMANN (1964) étudiant les formes de P en liaison avec le pH de sols bruns lessivés. Ils constatent d'une part que la teneur en phosphore minéral augmente avec le pH de 300 à 450 ppm et que la teneur en phosphore organique diminue de 10 % ; d'autre part que si l'on observe les courbes des 3 formes de phosphore en fonction

du pH on note une augmentation beaucoup plus rapide de P (Ca) au-dessus de pH 7 alors que le rapport PFe/PAI décroît très vite lorsque le pH augmente.

*de solution du sol*



Ces auteurs signalent également que  $P (Al + Fe)/P (Ca)$  donne une courbe plus élevée dans les sols cultivés que dans les sols forestiers et que la décroissance de ce rapport est plus rapide dans le dernier cas.

### III - RETROGRADATION DU PHOSPHORE PAR PRECIPITATION, CRISTALLISATION, ou INCLUSION -

Le phosphore paraît s'insolubiliser et perdre son caractère autodiffusible par deux processus : précipitation d'une part, fixation par cristallisation ou inclusion d'autre part.

#### A - Précipitation

C'est une évolution brutale du phosphore soluble et échangeable qui intervient en milieu très acide et souvent réducteur contenant  $Al^{+++}$  ou  $Fe^{++}$  solubles et il se forme du phosphate d'alumine ou de fer insoluble (ou peu soluble) ; sous cette forme le rapport P/métal est élevé, de l'ordre de 1/2, alors qu'il est de 1/100 à 1/500 pour le phosphore échangeable adsorbé à la surface des hydrates colloïdaux. BLANCHET a montré que l'adsorption de  $PO_4$  par Al s'accompagne d'une précipitation importante : 68 % seulement du phosphore ainsi adsorbé est récupérable par dilution isotopique ; si on desèche l'hydrate d'alumine, cette fraction récupérable tombe à 35 % ; ces faits expliquent la précipitation du phosphore dans les sols ferrallitiques et les podzols.

Au contraire l'adsorption du phosphore par  $Fe(OH)_3$  colloïdal s'accompagne d'une précipitation beaucoup plus lente, plus progressive ; elle s'accroît au cours de la deshydratation des oxydes de fer, il s'agit alors des processus étudiés dans le paragraphe suivant.

## B - Cristallisation ou inclusion

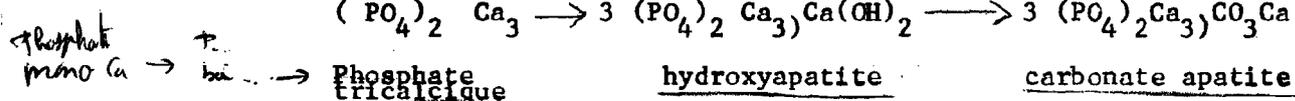
Ces processus correspondent à l'insolubilisation lente et progressive du phosphore fixé par la réorganisation des molécules des colloïdes qui évoluent vers des formes cristallines ou concrétionnées ; les ions  $PO_4$  sont "emprisonnés" par ces formes cristallines. Il semble qu'on puisse invoquer les processus suivants :

1)- Pénétration de ces ions dans les intervalles des feuillets des argiles, lors de l'organisation des gels en phyllites ou par suite de l'écartement des feuillets de certaines argiles gonflantes.

2)- Fixation sous forme incluse dans les concrétions d'oxydes de fer (goethite) ; CHANG et JACKSON ont montré que cette forme n'était libérée que par l'emploi d'un réducteur énergétique (1957). Cette fixation est fréquente dans les sols podzoliques et les sols ferralitiques où le concrétionnement du fer est particulièrement important.

3)- Fixation par inclusion dans la gibbsite résultant de la cristallisation de  $Al(OH)_3$  dans les sols ferralitiques.

4)- Fixation en milieu calcaire lorsque le pH dépasse 8, par rétrogradation "apatitique" ; le phosphore prend une forme progressivement moins soluble et plus cristalline.



BARBIER a montré que la précipitation à pH 8 n'avait lieu qu'à partir d'une concentration de 3,6 ppm (3,6 mg/litre) ; ce même auteur (1966) indique que les chaulages au delà de la neutralité diminuent la concentration en phosphate de la solution du sol mais augmentent la mobilité des ions phosphatés adsorbés.

## C - Conclusion

Le sol étant un milieu riche en équilibres chimiques et biologiques il existe de nombreuses variantes de ces formes. L'emploi des techniques isotopiques si elles confirment les idées directrices d'évolution des principales formes de phosphore dans le sol indiquent des résultats beaucoup plus nuancés, tout au moins dans les sols dont la réaction ne s'écarte pas considérablement de la neutralité.

## IV - VARIATION de l'ASSIMILABILITE en FONCTION du TYPE de SOL

### A - Sols calcaires

Prédominance du phosphore lié à Ca. Il existe un danger de rétrogradation apatitique à pH supérieur à 8. D'après MACKENZIE (1962) le seuil de dominance de P-Ca se situe à pH 7,4 ; au-dessus P-Ca domine, en-dessous il est équilibré par P - Al. BARBIER signale la possibilité d'une redissolution du phosphore précipité par rupture de l'équilibre dans la solution du sol, rupture consécutive à une absorption par les plantes.

A  $ppm$  sous forme soluble, dose fractionnée, au niveau des racines. Au moments où les plantes en ont besoin.

BLANCHET (1963) a effectué une étude sur les rendzines du Berry, 60 à 90 % du phosphore est lié au calcium : il existe une insolubilisation apatitique marquée mais lente et progressive, cette dernière est encore très faible deux mois après l'incorporation d'un engrais soluble. Les insolubilisations ne se produiraient qu'à partir d'un seuil minimum d'enrichissement car cet auteur n'a pas rencontré d'insolubilisations notables dans les sols peu enrichis bien que les fumures apportées soient assez abondantes.

Le principal problème consiste donc à élever, dans les meilleures conditions, le niveau phosphorique de sorte que le phosphore ne constitue pas un facteur limitant vis-à-vis de fortes fumures azotées. Or le niveau optimum dépend de la quantité de terre fine exploitable par les racines (de 1500 à 4500 t/ha.) Donc dans les rendzines, le maximum de difficultés se rencontrera dans les sols peu profonds et caillouteux, en général les plus calcaires et où le stock de phosphore réparti sur une faible quantité sera soumis à une insolubilisation plus intense.

#### B - Sols bruns neutres

Sols à mull saturés, sans  $\text{CO}_2\text{Ca}$ . Il semble d'après SCHEFFER et BLANCHET que le taux de P - Ca très assimilable se situe aux environs de 30 % ; le reste vraisemblablement existant sous forme de P - Al.

*Apports équilibrés et fumure de fond valable*

#### C - Sols bruns acides

Il est évident que la forme de P - Ca est à peu près inexistante. Le rôle régulateur est fonction des proportions d'aluminium échangeable ( $\text{Al}^{+++}$ ) ou non échangeable adsorbé par les argiles. YUAN (1962) pense qu'il existe une évolution progressive de P - Al sous l'influence des variations d'humectation et de dessiccation saisonnières vers la forme P-Fe et P-Fe incluse dans les oxydes cristallisés ; l'on assiste donc à une diminution très lente mais progressive du phosphore.

*Intérêt apporter engrais contenant Ca*

#### D - Podzols

*fractionné au moment de la rétrogradation*

Le phénomène de rétrogradation se complique d'un appauvrissement par lessivage. Lors de la première phase le phosphore est lessivé sous forme P-Ca, entraînant par ce fait un appauvrissement total des horizons supérieurs. Dans l'horizon B on assiste donc à une accumulation de phosphore, mais dans les phases d'acidification ultérieure, ce phosphore se transforme en phosphate d'alumine qui évolue en phosphate de fer avec phénomène de précipitation et d'insolubilisation totale (FRANZMEIER et al. (1963).

#### E - Sols ferrallitiques

La rétrogradation atteint son maximum par dominance plus qu'exclusive des formes cristallisées ou incluses.

*P en petite quantité*

### V - TECHNIQUES d'AMELIORATIONS de l'ASSIMILABILITE

A - JACKS (1954) a démontré l'influence des amendements organiques actifs : l'emploi des fumiers en même temps que des engrais phosphatés freine la rétrogradation, favorise l'adsorption sous une forme facile à solubiliser. La matière organique active, non seulement libère sa réserve de phosphore, mais agit aussi indirectement en empêchant toutes les formes de rétrogradation. Elle joue aussi un rôle mobilisateur des formes les moins assimilables d'où l'intérêt sur ce point des engrais verts à base de légumineuses ; en effet, ces plantes sont des puissants extracteurs du phosphore même peu soluble et elles le restituent ensuite progressivement par minéralisation.

**B - Amendements calcaires :**

Le chaulage augmente l'assimilabilité du P-Fe dans les sols acides :



Un processus identique se produit avec Al ; cependant la précipitation d'alumine entraîne du phosphore insoluble. JUSTE (1964) a montré que le chaulage diminue les troubles de l'assimilation du phosphore en supprimant l'excès d'alumine libre du sol : l'apport du calcium diminue la teneur en phosphore des parties aériennes et surtout des racines, teneur anormalement élevée, en présence d'alumine libre.

## CHAPITRE III :

## ETUDE DE LA DYNAMIQUE du PHOSPHORE DANS LE SOL

L'emploi des éléments radioactifs a permis une étude beaucoup plus approfondie de l'équilibre des ions phosphoriques dans les sols.

## I - DETERMINATION DU PHOSPHORE ISOTOPIQUEMENT DILUABLE : E

La mise en contact d'un colloïde retenant sous forme adsorbée une certaine quantité de phosphore naturel avec une solution renfermant une petite quantité d'ions  $PO_4$  dont le phosphore est radioactif, met en évidence les échanges spontanés existant en permanence entre les phases solide et liquide. Simultanément des ions  $^{31}PO_4$  passent de la phase liquide sur la phase solide ; grâce à l'agitation thermique, ces échanges se poursuivent indéfiniment mais on aboutit, après un délai plus ou moins long, à un équilibre statistique entre les ions en mouvement tel que le rapport des ions  $^{31}PO_4 / ^{32}PO_4$  de la solution et celui de la phase solide devient constant. Cette autopermutation aboutit à une dilution isotopique de chacune des deux masses dans l'autre et le phosphore ainsi déterminé constitue le phosphore isotopiquement diluable ou autodiffusible et correspond à la fraction échangeable du phosphore du sol. En résumé si l'on ajoute à la solution d'un sol une très petite quantité connue, négligeable dans le bilan de  $^{32}P$  radioactif, il est donc possible d'établir la relation suivante :

$$\frac{R}{M} = \frac{r}{m} \quad \text{ou} \quad \frac{m}{M} = \frac{r}{R}$$

$R$  = radioactivité totale introduite  
 $r$  = radioactivité présente dans la solution de sol  
 $M$  ou  $E$  = masse totale de  $P_2O_5$  autodiffusible  
 $m$  = masse de  $P_2O_5$  présente dans la solution de sol.

Si l'on utilise du phosphore radioactif sans entraîneur ; substance contenant uniquement l'isotope radioactif ou du moins en contenant une forte proportion, on rend le milieu radioactif sans pratiquement modifier la masse de cet élément. Si au contraire on utilise une substance radioactive avec entraîneur (engrais marqué) la relation devient la suivante :

$$\frac{\text{Radioactivité totale (R)}}{P_2O_5 \text{ autodiffusible préexistant} + P_2O_5 \text{ ajouté (M}_2\text{)}} = \frac{(r) \text{ Radioactivité en solution}}{P_2O_5 \text{ en solution (m)}}$$

Cette relation où les grandeurs  $R$  et  $M_2$  sont connues permet de déterminer  $P_2O_5$  autodiffusible ou isotopiquement diluable si l'on dose  $m$  et  $r$ .

A noter qu'une valeur  $E$  modifiée peut être également mesurée directement par l'intermédiaire de la solution du sol ; en effet, la dilution isotopique ne rend pas compte des échanges pouvant se produire avec les végétaux, échanges entraînant obligatoirement un changement d'équilibre ; ceci peut être plus ou moins compensé par l'introduction d'une résine anionique en fin d'agitation (GACHON 1966).

## II - MESURE DE LA VALEUR L

Si l'on enrichit un sol avec une certaine quantité d'acide phosphorique sous forme d'engrais soluble, une partie seulement de ce phosphore ajouté se retrouve sous forme isotopiquement diluable après un certain temps. Une partie de cet apport a donc été fixée énergiquement par le sol, en particulier sous forme de précipités plus ou moins solubles, mais cette rétrogradation n'est cependant que temporaire, tout au moins partiellement. En effet, si l'on appauvrit le sol, la diminution de phosphore isotopiquement diluable est inférieure à la quantité extraite, ce qui démontre qu'une fraction des ions  $PO_4$  fixée repasse dans la fraction du phosphore mobile du sol. Certains phénomènes physiques tels que l'alternance de dessiccation et de réhumectation favorisent ce passage.

Cette constatation a conduit à déterminer la valeur (L) LARSEN (1952) qui permet de déterminer la quantité de phosphore approximativement adsorbée par le sol et susceptible de participer à l'alimentation des plantes. Cette valeur L s'exprime en quantité de phosphore par unité de sol (p.p.m.) En effet, une plante cultivée sur une solution contenant du phosphate radioactif, renferme des atomes  $^{32}P$  et  $^{31}P$  dans le même rapport numérique que dans le milieu de culture ou la solution de sol (P autodiffusible). Les ions  $^{32}P$  et  $^{31}P$  répartis au hasard dans la solution sont prélevés également au hasard par la plante, c'est-à-dire dans la proportion où ils se trouvent dans le milieu. Le fait se traduit par la relation :

$$\frac{R}{M} = \frac{r}{m}$$

R = radioactivité totale introduite

r = radioactivité dans la plante

M = masse de  $P_2O_5$  introduite

m = masse de  $P_2O_5$  dans la plante.

Dans la méthode de LARSEN, le  $^{32}P$  avec ou sans entraîneur est mélangé très intimement au sol, de façon complète et aussi rapide que possible. Ce but est atteint lorsque dans la plante, le rapport  $^{32}P/^{31}P$  reste constant dans le temps. La valeur L peut alors être calculée; Elle n'indique que la quantité de réserves et non leur assimilabilité, qui dépend d'autres facteurs (potentiel électrochimique, mobilité); une indication de l'assimilabilité est toutefois obtenue par la quantité de  $^{31}P$  absorbée par la plante, ce qui représente un résultat accessoire quoique très intéressant de la détermination de la valeur L.

### III - MESURE DE LA VALEUR A

La méthode de FRIED et DEAN (1952) a pour but d'apprécier directement le "pouvoir alimentaire" du sol. C'est-à-dire son aptitude à l'alimentation des plantes en la comparant à celle d'une fumure phosphatée donnée, que l'on peut appeler "standard" ou "étalon". Cette aptitude est exprimée par la valeur "A" qui représente l'efficacité alimentaire des réserves du sol (et non la quantité de réserves). Elle est calculée en  $\text{kg/ha P}_2\text{O}_5$  de l'engrais utilisé pour sa détermination, par exemple en  $\text{kg/ha de P}_2\text{O}_5$  de superphosphate.

En effet, une plante mise en présence de deux sources d'un même élément nutritif prélèvera cet élément dans chacune des deux sources en fonction de son assimilabilité. Ce qui permet d'établir la relation suivante :

$$\frac{Oa}{Ob} = \frac{A}{B}$$

A = phosphore du sol

B = phosphore apporté par l'engrais (étalon de comparaison)

Oa = phosphore dans la plante provenant du sol

Ob = phosphore dans la plante provenant de l'engrais.

Cette méthode nécessite donc que les deux sources de l'élément nutritif restent bien distinctes (réserves du sol et P de l'engrais). Dans ce cas la dilution isotopique doit donc être inexistante, de façon que l'on puisse distinguer dans la plante le phosphore qui provient de l'engrais et celui qui provient du sol. L'alimentation des plantes à partir des réserves du sol d'une part, et à partir de fumure d'autre part, est alors comparée.

Cette nécessaire absence de dilution isotopique pose dans la détermination de la valeur A la principale difficulté technique. Il semble que la meilleure solution soit de localiser la fumure, de manière à limiter au maximum la diffusion du phosphore de l'engrais (RENNIE et SPRATT, 1962)

Ces mêmes auteurs ont montré que des valeurs A déterminées au champ étaient en bonne corrélation inverse avec la réaction des cultures à la fumure phosphatée. Par contre des valeurs A déterminées en vase de végétation reflètent mal la réaction aux engrais car elles font abstraction des caractères du profil, du régime hydrique ; facteurs intervenant dans la mobilité des ions (BLANCHET et AL, 1965). Ceci peut être expliqué en grande partie par l'influence de la quantité du volume de sol exploitable par les racines. D'après ces auteurs le rapport - Valeur A au champ sur valeur A en pots, serait voisin de 1 lorsque le volume prospecté par les racines serait de l'ordre de 3000 t/ha. Par contre dans les sols les plus caillouteux et les moins profonds, la valeur A dans les sols en place n'atteint que 40 % de la valeur observée en vases de végétation.

En conclusion l'étude de A au champ revêtira surtout un grand intérêt lorsqu'il est difficile d'apprécier le niveau phosphorique ; cas des sols présentant des particularités physiques ou chimiques (quantité faible de terre fine - sols à très faibles ou à très forts pouvoirs adsorbants).

Une autre solution consiste à remplacer l'assimilabilité liée aux plantes par l'assimilabilité du phosphore par les microorganismes, en effet SASPORTES (1967) constate par augmentation de la teneur en phosphore organique radioactif une réponse beaucoup plus rapide avec les microorganismes ce qui réduit d'autant les échanges et par ce fait même la dilution isotopique.

**IV - COMPARAISON DES DIFFERENTES VALEURS**

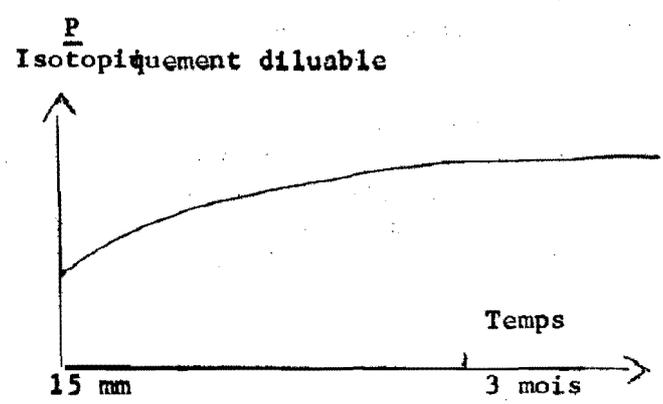
- La dilution isotopique permet de mesurer la mobilité des ions adsorbés à la surface de colloïdes minéraux du sol, c'est-à-dire la plus ou moins grande facilité avec laquelle ces ions peuvent être désorbés pour passer dans la solution du sol lorsque celle-ci a été appauvrie par l'absorption radiculaire, elle constitue donc un élément important de la dynamique de l'alimentation phosphatée des végétaux. Cette désorption est le plus souvent assez lente et il faut attendre plusieurs heures, sinon plusieurs jours pour voir se rétablir l'équilibre dans un système-sol-solution déséquilibré. L'absorption de phosphore par les plantes peut se trouver limitée dans les sols à vitesse de désorption lente. Nous verrons plus loin les différents facteurs pouvant intervenir sur cet équilibre et leurs conséquences au point de vue de l'alimentation des plantes en phosphore.

- La valeur L représente la réserve du sol alors que A indique l'assimilabilité de cette réserve exprimée en unité de l'engrais pris comme référence. Dans les sols très pauvres en phosphore les valeurs A et L doivent être presque nulles ; la plante s'alimentant dans ces cas essentiellement aux dépens de l'engrais. Dans les sols de richesse quelconque il est possible de déterminer la part des deux sources et les comparaisons entre les valeurs L et A permettent de mieux distinguer les facteurs de l'assimilabilité des réserves. BLANCHET (1965) a montré que pour des sols différents il n'existe pas de rapport constant entre les valeurs L et A. D'autre part, SASPORTES (1967) a constaté que pour un même pH l'addition de Fer et d'Aluminium au sol ne modifie pas le rapport entre ces deux valeurs.

Actuellement il semblerait opportun de déterminer pour un type de sol les valeurs A et L, puis de suivre les fluctuations de E (mesure beaucoup plus rapide) ; en effet, GACHON (1966) vient signaler que cette dernière valeur donne de loin, par rapport aux méthodes de dosage chimique classiques, des résultats beaucoup plus conformes aux réponses des végétaux à la fertilisation phosphatée.

**V - VITESSE et EQUILIBRE de DESORPTION**

Notons tout d'abord que la cinétique de la dilution isotopique correspond à la cinétique de la désorption, en effet, les deux phénomènes sont également liés à la mobilité des ions adsorbés. Lorsqu'on mesure P isotopiquement dilué après des temps de contact variables, on constate qu'une fraction des ions  $PO_4$  est très mobile et intervient très rapidement dans les phénomènes de dilution isotopique ; une autre partie plus énergiquement fixée, n'intervient que progressivement dans ces échanges.



En ce qui concerne les argiles, la phase rapide de désorption correspondrait à la fraction fixée par les bases (Ca échangeable notamment) et serait la fraction très mobile ; à l'opposé la fraction de phosphore adsorbé par les atomes Al du réseau, plus énergiquement fixée correspondrait à la phase plus lente de la désorption.

En ce qui concerne les hydroxydes métalliques colloïdaux, la vitesse de désorption présente une certaine analogie avec ce qui se passe pour les argiles et on note encore ici deux phases distinctes, l'une rapide, l'autre plus lente quoique ces deux phases soient ici beaucoup moins tranchées.

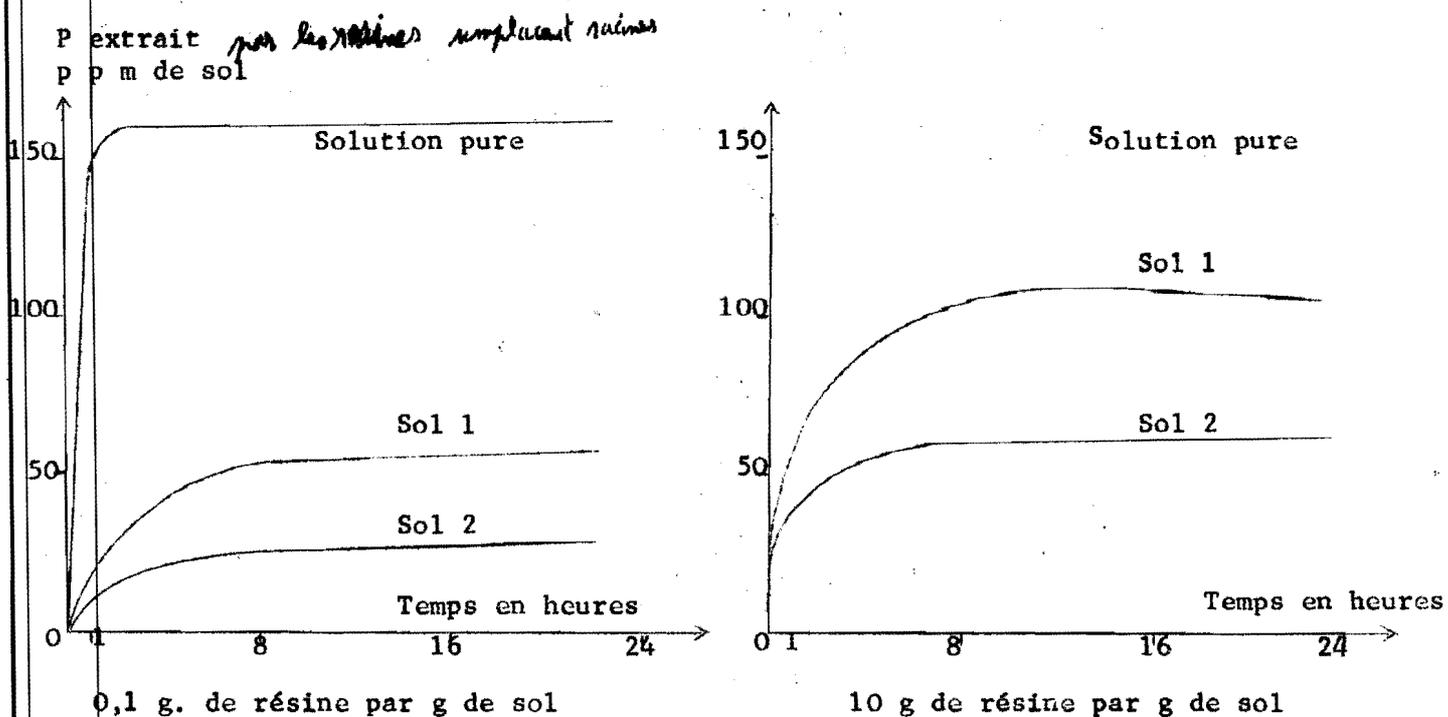
Enfin dans le cas d'un sol où nous nous trouvons en présence de diverses formes d'acide phosphorique adsorbées par plusieurs colloïdes en mélanges ou précipités à l'état de phosphates plus ou moins alcalins ou des phosphates métalliques, on observe une phase très rapide de désorption, une phase plus lente, et enfin une phase beaucoup plus lente susceptible de se poursuivre durant des mois.

## VI - FACTEURS INTERVENANT SUR LA MOBILITE DES IONS

Nous avons vu par la comparaison des valeurs A et L que la quantité des réserves nutritives d'un sol ne suffit pas à bien caractériser ces réserves mais qu'il est important de considérer un terme de potentiel ou d'activité des ions  $PO_4$ . L'étude de plusieurs facteurs intervenant sur la désorption des ions  $PO_4$  a été effectuée par BLANCHET et CHAUMONT à l'aide de résines anioniques ; ces résines étaient mises en contact avec des suspensions de sol ou le sol lui-même. L'emploi du  $^{32}P$  sur divers sols dont les valeurs L avaient été déterminées a permis de tirer quelques idées directrices.

### A - Vitesse et équilibre de désorption

Pour deux sols présentant des réserves phosphoriques comparables mais dont les pouvoirs adsorbants sont très différents l'examen des courbes de désorption met en relief les faits suivants :



Quantités de P extraites par la résine en fonction du temps.

*Sol 2 complexe absorbant > celui de sol 1 -*

**B- Interférence entre les contacts sol-résine au cours de la désorption**

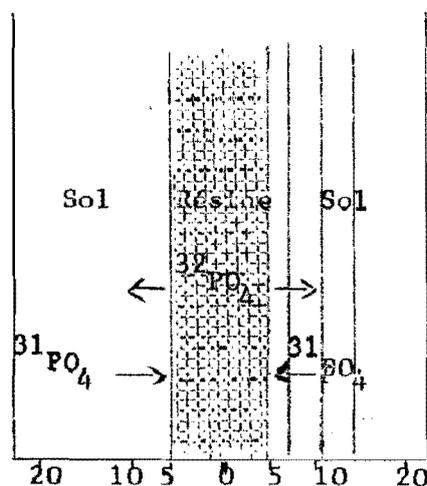
Dans une autre expérience, les auteurs ont mis en comparaison deux séries d'échantillons d'un même sol, en utilisant des quantités de résine variant de 1 à 1 000, avec le sol en suspension ou simplement maintenu à une humidité voisine de la capacité de rétention.

g de résine par g de sol	P extrait en p.p.m de sol		Rapport P extrait suspension / P extrait sol humide
	Suspension	Sol humide	
0,01	12	1,7	7,05
0,10	31	6,3	4,90
0,50	53,1	12,5	4,25
3,	77,5	33,8	2,30
10,	81,6	56,3	1,45

On constate que si l'on augmente la proportion de résine, l'écart entre les résultats obtenus en suspension et dans le sol humide se réduit d'une façon très sensible. Ces faits mettent l'accent sur l'importance que peut revêtir le développement du système racinaire dans l'exploitation des réserves du sol par les végétaux.

**C - Diffusion des ions phosphoriques dans un sol humide**

Cette étude a été réalisée grâce à l'emploi de colonnes de résine anionique, de 1 cm de diamètre, disposées verticalement dans le sol étudié, lui-même placé dans des conditions d'humidité variables. Le sol et la résine avait été préalablement enrichi en  $^{32}\text{P}$  dans le but d'étudier les divers mouvements possibles sol-résine et résine-sol. Après des temps variables, la terre était séparée en couronnes cylindriques concentriques de diamètres croissants autour de la résine et la radioactivité résiduelle ou acquise mesurée.



Distances du centre de la colonne en mm

Qu'ils se soient effectués dans le sens sol-résine ou résine-sol, les mouvements n'ont toujours intéressé que de très faibles distances. On n'observe une différence nette de la radioactivité du sol, dans l'un ou l'autre cas, que sur une distance de l'ordre du millimètre.

Le taux d'humidité exerce une grande influence sur ces phénomènes de diffusion. L'effet est particulièrement marqué dans les sols riches dont la phase liquide est plus concentrée en ions  $PO_4$  ; les mouvements résine-sol, dus au pouvoir adsorbant de celui-ci ont été beaucoup plus importants que les mouvements inverses sol-résine.

#### D - Influence du temps sur les processus de diffusion

Lorsqu'on met en contact un sol humide avec une résine anionique, la diffusion décroît rapidement avec le temps. Au fur et à mesure que la résine s'enrichit en ions  $PO_4$ , son champ d'attraction pour ces ions diminue, et il faudrait éliminer les ions captés par d'adsorbants antagonistes pour observer le phénomène tel qu'il se présente dans le sol lorsque la diffusion s'effectue au contact des racines. Néanmoins, la comparaison entre phosphore adsorbé par le ray-grass en vase de végétation et phosphore extrait par une colonne de résine en 8 H, montre une bonne corrélation et indique que les deux phénomènes obéissent aux mêmes facteurs.

E - Appauvrissement du sol au contact des racines - Afin d'examiner le rôle de l'exploration radiculaire du milieu au cours de l'alimentation phosphorique, les auteurs ont repiqué des plants de maïs dans des vases de végétation comprenant une couche de sol surmontant une couche de sable.

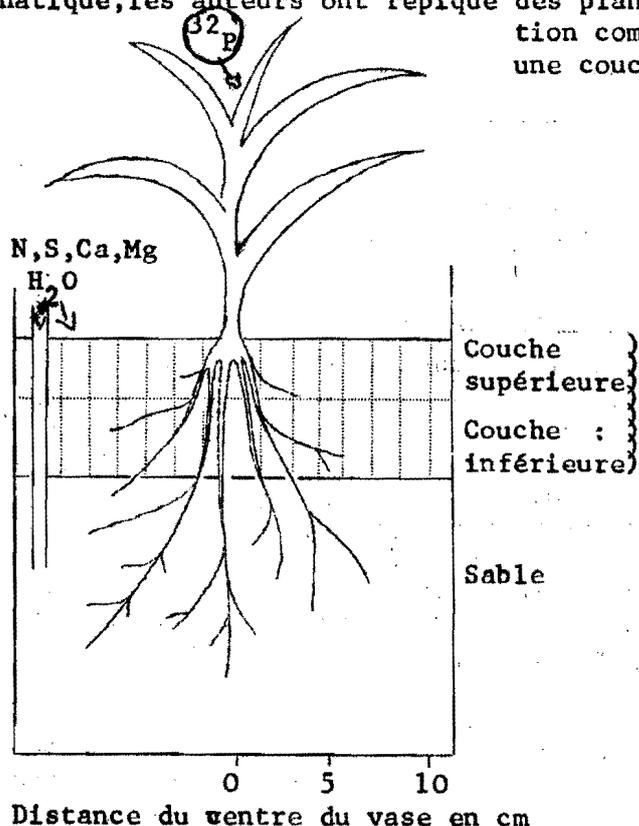


Schéma du dispositif expérimental utilisé pour obtenir des fractions de sol diversement exploitées par les racines. R. BLANCHET, C. CHAUMONT (1964)

Les racines s'étant principalement développées dans le sable, il est possible d'examiner l'appauvrissement des diverses tranches du sol en fonction du degré d'exploration radiculaire auquel elles ont été soumises ; en effet la seule source de phosphore dont pouvait disposer les plantes correspondait au phosphore des couches de sol ; néanmoins une petite quantité de  $32p$  a été apportée par les feuilles pour que les excréments racinaires marquent les portions de sol les plus exploitées.

En ce qui concerne l'alimentation phosphorique et l'exploration du sol par les racines, en sol à faible pouvoir adsorbant la plante a réalisé un bon développement de ses racines et parties aériennes, dont la teneur en phosphore est moyenne. Par contre en sol à fort pouvoir adsorbant, le développement végétatif est très faible et la plante apparaît nettement carencée en phosphore. L'alimentation phosphorique défectueuse a bien constitué le facteur limitant de la croissance en réduisant la croissance des parties aériennes et des racines; cet état de carence phosphorique a fortement limité l'exploration du sol par le système racinaire.

L'exploration racinaire à l'égard de l'absorption de P, peut être estimée à la fois par le poids des racines dans les diverses tranches et par la radioactivité excrétée. Ces deux critères concordent assez bien et font apparaître une exploration rapidement décroissante depuis le centre du vase jusqu'aux bords.

Les teneurs en P, qu'il s'agisse de P isotopiquement diluable ou de la concentration de la solution du sol, présentent une variation inverse: l'appauvrissement du sol ne s'est manifesté que vers le centre du vase partie bien explorée par les racines. Les teneurs des couches externes sont très proches des valeurs initiales; elles n'ont donc cédé à la plante que des quantités infimes de phosphore.

## VII - CONSIDERATIONS AGRONOMIQUES

Les divers aspects de la rétention et de la mobilité des ions  $PO_4$  dans le sol tels que nous les avons passés rapidement en revue, du moins pour les plus importants d'entre eux, mettent l'accent sur deux notions fondamentales.

### A - Importance du développement racinaire

L'amplitude de la diffusion des ions  $PO_4$  dans le sol étant très limitée, il est essentiel que les racinelles aient un développement suffisant pour permettre une bonne prospection du sol par le système racinaire. Les facteurs susceptibles de freiner le développement du système racinaire sont multiples et généralement d'ordre physique, chimique ou climatique. BLANCHET signale que les carences phosphoriques peuvent être induites par un état physique défavorable du sol entraînant un défaut de développement des racines. De plus, un système racinaire peut être bien développé, mais voir son activité racinaire réduite par une aération insuffisante (sols tassés, inondations, etc..) ou par une température trop basse.

Les facteurs chimiques jouent en aggravant encore la carence phosphorique dans un sol carencé. Dans un tel sol, le système racinaire voit son développement limité par une alimentation phosphorique insuffisante, empêchant les racines de prospecter au maximum les ressources du sol; c'est le fameux " cercle vicieux ". Une carence azotée peut induire une carence phosphorique en limitant le développement racinaire. D'autre part, il a été montré que l'adsorption de P par les végétaux est favorisée par l'azote (synergie N-P).

Si l'on peut admettre que les végétaux s'alimentent principalement à partir de la solution du sol dans les terres à faible pouvoir adsorbant présentant un bon état de fertilité, dans lesquelles cette solution du sol est relativement concentrée en ions  $PO_4$ , il ne peut en être de même dans des terres à pouvoir adsorbant élevé, dans lesquelles la solution du sol présente toujours une faible concentration en ions  $PO_4$ . Les prélèvements des racines ne peuvent s'effectuer dans ce dernier cas qu'au contact direct avec les particules solides du sol. D'autre part des études récentes ont mis en lumière l'étroit contact existant entre les radicelles et les particules de terre ainsi que l'existence de gels mucilagineux dans lesquels se développent des bactéries, entourant les parties actives des jeunes radicelles. Ces observations étayent la théorie suivant laquelle les prélèvements de l'acide phosphorique par les végétaux s'effectueraient principalement par contact direct et échanges entre le système racinaire et l'atmosphère ionique entourant les particules de sol.

Enfin la localisation des engrais dans le cas de sols pauvres correspond à un palliatif appréciable mais ne semblant pas dispenser d'envisager la constitution de réserves normales dans l'ensemble du sol, si l'on se propose d'obtenir des rendements élevés.

#### B - Importance du pouvoir adsorbant

Nous avons vu quelle était l'influence du pouvoir adsorbant sur la concentration de la solution du sol en ions phosphoriques, et que cette concentration est une fonction inverse de l'importance du pouvoir adsorbant.

#### C - Conclusion

Ainsi l'alimentation phosphatée des plantes dépend essentiellement de trois facteurs :

- Teneur du sol en ions  $PO_4$  adsorbés,
- Activité et mobilité de ces ions.

L'activité peut être estimée d'après la concentration en  $PO_4$  de la solution du sol et la mobilité d'après la vitesse des échanges isotopiques. BLANCHET a constaté qu'un indice I tel que :  $I = \text{Quantité de P isotopiquement diluable en un temps court} \times \text{concentration en P de la solution du sol}$ , tenant compte de ces facteurs, rendait bien compte des résultats culturaux donc des réactions des cultures aux engrais phosphatés.

En résumé, la fertilisation phosphatée doit consister à créer ou à maintenir un pouvoir alimentaire satisfaisant dans la quantité de terre réellement exploitée par les racines, celle-ci ne représentant qu'une fraction, variable selon les sols, de la terre arable.

Selon les possibilités de diffusion que permettent les divers types de sols, et en particulier leur pouvoir adsorbant, la fertilisation doit donc revêtir des aspects très différents, les sols à pouvoir adsorbant élevé nécessitant des réserves beaucoup plus importantes.

Enfin, en constituant des zones plus riches, la fumure annuelle et éventuellement la localisation assurent de meilleures conditions d'alimentation.

## CHAPITRE IV : DIAGNOSTIC USUEL DES BESOINS EN PHOSPHORE

Les besoins en engrais phosphatés peuvent être déterminés soit par l'analyse des sols, soit par l'analyse des plantes, soit par combinaison des deux méthodes.

### I - ANALYSE DES SOLS

La plupart des méthodes employées couramment sont conventionnelles et assez empiriques. Comme nous l'avons vu précédemment elles ne peuvent donner qu'une satisfaction partielle, et l'on doit s'attendre, dans un avenir plus ou moins rapproché, à une transformation de ces méthodes. Telles qu'elles sont appliquées, elles donnent néanmoins de très utiles indications sur les fumures à employer.

Outre le dosage du phosphore total par la méthode céruléomolybdique (DUVAL, 1964) les méthodes les plus couramment utilisées sont les suivantes :

#### A)- Méthodes basées sur l'estimation des réserves de stock de phosphore pouvant concourir à l'alimentation des plantes.

1)- Méthode Dyer ou méthode citrique. Elle est couramment utilisée en France, pour les terres non calcaires. L'interprétation des résultats est fonction de la nature du sol ; cette méthode à l'acide citrique permet l'extraction de P-Ca et d'une partie de P-Al.

2)- Méthodes utilisant soit l'oxalate d'ammonium ( JORET et HEBERT), le citrate de sodium ( RADET) ou l'acide sulfurique dilué sont applicables aux terres calcaires.

3)- Méthode américaine réactif de Bray n°4 qui par l'utilisation de réactifs acides solubilise P-Ca et une fraction de P-Al puis par des réactifs alcalins solubilise P-Al et P-Fe. BONNEAU et DUCHAUFOUR préconisent également ce système mixte mais avec des réactifs plus puissants ; pour les sols forestiers cette méthode semble actuellement être la plus significative vis-à-vis de la réponse aux engrais ( HABIBI 1970).

4)- Cette séparation est encore accentuée par l'emploi de la méthode de CHANG et JACKSON (1957) ; les auteurs déterminent séparément les quantités de  $P_2O_5$  absorbées par les composés aluminiques, ferriques et calcaïques, ceci au moyen de traitements successifs par  $FNH_4$  0,5N neutre, NaOH N/10 et  $SO_4H_2$  0,5 N.

Les résultats obtenus par ces méthodes ne peuvent être interprétés que sur la base d'essais de fumures au champ, à l'échelon régional voir même local. Ces résultats ne sont en effet généralisables qu'à l'intérieur d'un même type de sol. Il importe donc de ne demander d'interprétation des résultats d'analyses qu'à des personnes compétentes, connaissant bien le milieu régional. Cependant afin de permettre une interprétation très large des résultats d'analyse il est possible d'utiliser le tableau suivant :

$P_2O_5$ assimilable P.o/oo du sol		Besoin d'engrais phosphatés en culture intensive
Terres à faible complexe absorbant.	Terres à fort complexe absorbant	
Plus de 0,30 de 0,30 à 0,25 de 0,25 à 0,16 de 0,16 à 0,10 Moins de 0,10	Plus de 0,40 de 0,40 à 0,32 de 0,32 à 0,20 de 0,20 à 0,12 Moins de 0,12	Nul (réserves importantes) Nul immédiatement Modéré et variable Certain Impérieux

**B - Méthodes basées sur l'étude de la richesse en phosphore de la solution aqueuse du sol**

1)- La méthode Morgan BARBIER (acide acétique et acétate de sodium), fournit plutôt une indication de l'activité des ions  $PO_4$ , contrairement aux précédentes qui cherchaient à évaluer la valeur, des réserves P assimilable).

A signaler que le laboratoire du Syndicat d'amélioration des Soies (SAS) à Gargenville (Seine et Oise) combine les deux méthodes : indice Morgan-Barbier donnant le  $P_2O_5$  immédiatement assimilable par la plante, et extrait citrique renseignant sur les quantités de  $P_2O_5$  qui peuvent être mises ultérieurement à la disposition de la plante (acide phosphorique "en réserve"). Le rapprochement de ces deux données serait intéressant, car on peut avoir une faible teneur en  $P_2O_5$  immédiatement assimilable dans des sols bien pourvus en phosphate de réserve et, dans ce cas, il convient d'activer la vie microbienne du sol par des apports organiques afin de faciliter la transformation du phosphore de réserve en phosphate assimilable. Cependant d'après LIBOIS (1966) cette combinaison de méthode n'en reste pas moins un palliatif encore insuffisant pour permettre l'appréciation des besoins réels en phosphore du sol.

2)- Certes l'utilisation du  $P^{32}$  permettrait de mieux situer l'importance de divers facteurs intervenant sur le calcul de la fumure phosphatée mais elle ne peut être actuellement appliquée en série dans les laboratoires. Aussi BLANCHET et Al (1963) préconisent une méthode moins complète mais réalisable en série et basée sur le fait que l'agriculteur doit savoir avant de fixer le niveau de sa fumure phosphatée - si le taux d'acide phosphorique dans la solution du sol est suffisant ; - si le sol a des réserves importantes ou non ; - si ces réserves sont rapidement mobilisables. On voit la complexité du problème, car il ne suffit pas d'avoir des solutions assez riches à un moment donné, il faut encore que les réserves puissent renouveler convenablement les ions  $PO_4$  des solutions, au fur et à mesure de leur absorption par la plante.

Cette méthode consiste à établir les trois données suivantes :

-  $P_2O_5$  présumé assimilable extrait à l'oxalate par la méthode JORET HEBERT qui présente l'avantage d'être applicable à la majorité des sols.

- Concentration de la solution du sol en  $P_2O_5$  désorbé à l'équilibre contre une solution de  $CaCl_2N / 100$ .

- Pouvoir adsorbant du sol par une technique simplifiée, en établissant une courbe d'adsorption sur deux échantillons de 12,5 g de sol agités dans 100 ml de  $CaCl_2N / 100$  ayant reçu respectivement des apports de 0,250 et 0,500 g de phosphore sous forme  $PO_4 H_2 K$ . L'acide phosphorique restant en solution à l'équilibre est dosé par colorimétrie-molybdimétrie. La courbe joignant les trois points : concentration de la solution du sol et concentration de solutions à l'équilibre après ajout des deux doses donne une bonne indication du pouvoir adsorbant du sol vis-à-vis des ions  $PO_4$ .

En considérant les trois données ainsi établies : estimation du stock présumé assimilable, activité des ions  $PO_4$  et pouvoir adsorbant, il devient aisé d'établir un protocole de fertilisation, en tenant compte des réactions de précipitation susceptibles d'intervenir dans les sols très calcaires par exemple, dans lesquels les fumures de redressement devront être étalées sur un certain nombre d'années. A titre d'exemple, une réserve assimilable faible et un fort pouvoir fixateur indiquent un sol ayant besoin de fumures phosphatées de fond ; une réserve assimilable forte et un faible pouvoir fixateur indiquent un sol riche en  $P_2O_5$ . L'interprétation théorique des résultats donne une image du sol suffisamment détaillée pour que l'on puisse apporter très généralement une réponse valable, entre autre l'examen du pouvoir adsorbant permet d'éviter la constitution d'un stock de phosphore dans des sols légers.

## II - ANALYSE DES PLANTES

Cette méthode est basée sur l'étude des corrélations entre les rendements obtenus et la teneur en phosphore des plantes. La technique la plus utilisée correspond au diagnostic foliaire et elle donne une bonne estimation de l'intensité de l'alimentation phosphatée. Cette détermination constitue certainement la meilleure méthode d'appréciation de l'alimentation chez les plantes pérennes. Des techniques récentes tendent à se baser sur les résultats d'analyse de la sève et du suc cellulaire mais actuellement ce mode de diagnostic n'est pas encore parfait.

Notons également qu'une grave insuffisance de l'alimentation phosphatée se traduit par des symptômes pathologiques, qu'il est utile de connaître. Mais l'absence de manifestations pathologiques ne signifie pas nécessairement que la plante soit bien alimentée. Les symptômes de la carence phosphatée ont été décrits notamment par WALLACE ; on observe en particulier chez les céréales, une couleur vert bleuâtre des feuilles et des tiges, virant ensuite au pourpre ; la teinte pourpre est assez caractéristique de la déficience phosphorique, mais elle peut également être due à d'autres causes.

Il faut être prudent dans le diagnostic des carences d'après les symptômes pathologiques.

## CHAPITRE V : PRINCIPAUX ENGRAIS PHOSPHATÉS

### 1 - CLASSIFICATION DES ENGRAIS PHOSPHATÉS

#### A - En fonction de la forme du phosphore

- 1)- Monocalcique  $(\text{PO}_4\text{H}_2)_2\text{Ca}$  ou  $(\text{PO}_4)_2\text{CaH}_2$  soluble dans l'eau au moins à 1,5%.
- 2)- Bicalcique  $(\text{PO}_4\text{H})_2\text{Ca}_2$  peu soluble dans l'eau de l'ordre du 1/6000.
- 3)- Tricalcique  $3(\text{PO}_4)_2\text{Ca}_3$ ,  $\text{F}_2\text{Ca}$  du type apatite pratiquement insoluble dans l'eau.
- 4)- Phosphate tétracalcique  $\text{P}_2\text{O}_9\text{Ca}_4$  soluble dans l'acide citrique.
- 5)- Phosphate de Fer et aluminium solubles dans le citrate d'ammonium alcalin.

#### B - En fonction de la solubilité

On distingue les engrais phosphatés :

- solubles
- hyposolubles
- insolubles.

Il s'agit d'une classification admise ( légale ) mais très arbitraire.

1)- En ce qui concerne le phosphate soluble dans l'eau, ce caractère est suffisant pour définir un engrais phosphaté.

2)- Le terme hyposoluble présente un sens erroné ou plutôt un non sens en effet, comme définition il s'agit d'engrais plus ou moins soluble dans des réactifs différents ; à titre d'exemple le phosphore des scories classées comme hyposoluble est soluble dans l'acide citrique, mais celui des phosphates naturels insoluble l'est également en partie ; d'autre part le phosphore des scories révèle une certaine solubilité dans l'eau aux faibles concentrations des solutions du sol. Enfin si nous considérons la solubilité dans l'eau chargée de gaz carbonique ( réactif réputé valable par les agronomes) le bicalcique ( hyposoluble) égale le superphosphate ( soluble).

B'autre part, la valeur agronomique des engrais phosphatés basée uniquement sur une comparaison des différents rendements obtenus peut conduire à des conclusions erronées ; en effet, le comportement dépend certes de la composition chimique de l'engrais mais également des propriétés du sol, lesquelles conditionnent la fixation et l'évolution dans le temps du phosphore ( BOISCHOT , 1960)

### II - EVOLUTION DES ENGRAIS DANS LE SOL

#### A - Evolution de la partie soluble des engrais

Notons que la distance de diffusion du phosphore soluble augmente avec le temps de diffusion et le taux de phosphore apporté ( HESLEP 1954) ; elle augmente également avec le taux d'humidité mais à l'inverse les

sels azotés et potassiques réduisent cette diffusion. Néanmoins le grand facteur limitant correspond à la présence de calcaire dans le sol. D'après l'expérience de BARBIER et CHABANNES (1947) l'insolubilisation s'accomplit en deux temps :

- 1) - Fixation rapide et réversible par l'établissement de liaisons entre les ions phosphoriques solubles des engrais et les cations échangeables des argiles ; les phosphates ainsi retenus repassent facilement et intégralement en solution en présence d'acides dilués.
- 2) - Fixation lente qui s'accompagne d'une transformation progressive en phosphates insolubles dans les acides dilués. Dans le cas des sols calcaires il se formerait dans un premier stade un composé intermédiaire, phosphate de chaux gélatineux de formule mal définie mais qui resterait facilement solubilisable.

#### B - Evolution de la partie insoluble des engrais

Les engrais phosphatés contenant des formes directement non assimilables subissent une véritable digestion plus ou moins longue en fonction de leur finesse et de leur forme de cristallisation. Finalement une certaine fraction passe dans la solution du sol ; notons qu'un pH modérément acide favorise considérablement cette dissolution.

### III - LES PHOSPHATES DE CHAUX NATURELS

#### A - Origine et Production mondiale

En maintes régions du globe, l'homme a trouvé des gisements de phosphates de chaux, contenant presque toujours du fluorure de calcium, ils se présentent soit à l'état d'apatites (formes cristallisées) soit à l'état de phosphorites (complexes apatitiques fluo-calciques) plus ou moins amorphes.

1) - Les filons se rencontrent dans les failles rocheuses des terrains primitifs où les phosphates de chaux, sous l'action d'émanations fluorées, se sont transformés en apatites. Le plus important donnant lieu à une exploitation active, est celui de la péninsule de KOLA (U.R.S.S.)

2) - Les gisements beaucoup plus nombreux, constituent la principale source d'approvisionnement de l'industrie du superphosphate de chaux. Deux origines leur sont attribuées

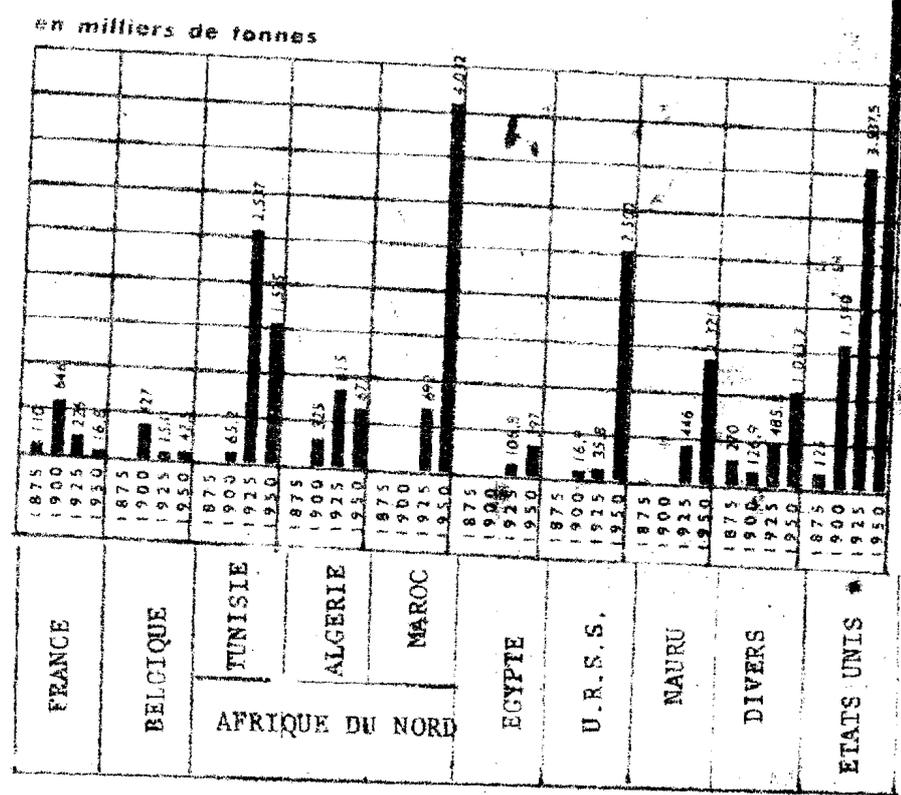
- l'une d'ordre chimique par précipitation du phosphore provenant des roches primitives, dissous dans les eaux des mers anciennes plus ou moins chaudes et chargées de gaz carbonique.

- l'autre d'ordre biologique et complémentaire de la première par accumulation au cours de longues périodes et sous des actions diverses, de cadavres d'organismes et d'animaux ayant emprunté le phosphore aux végétaux ou à l'eau (Afrique du Nord, Egypte, Amérique du Nord, etc...) Des gisements et des dépôts, de formations plus récentes, sont dus à une accumulation de cadavres et d'excréments d'oiseaux de mer qui donnent naissance à des composés phospho-azotés. Sous climat sec (Amérique du Sud) ces composés n'ont pas subi de transformation et sont appelés "guano".

Sous climat humide ( Océanie), l'azote a disparu par lessivage et l'on se trouve en présence de phosphate de chaux. Les uns et les autres constituent une source d'approvisionnement importants pour les pays du Pacifique, de l'Extrême-Orient et de l'Amérique du Sud

L'ensemble des réserves mondiales, les quantités extraites et la teneur en phosphore des minerais peuvent être résumés dans les graphiques ci-dessous :

I - IMPORTANCE de l'EXTRACTION des PHOSPHATES



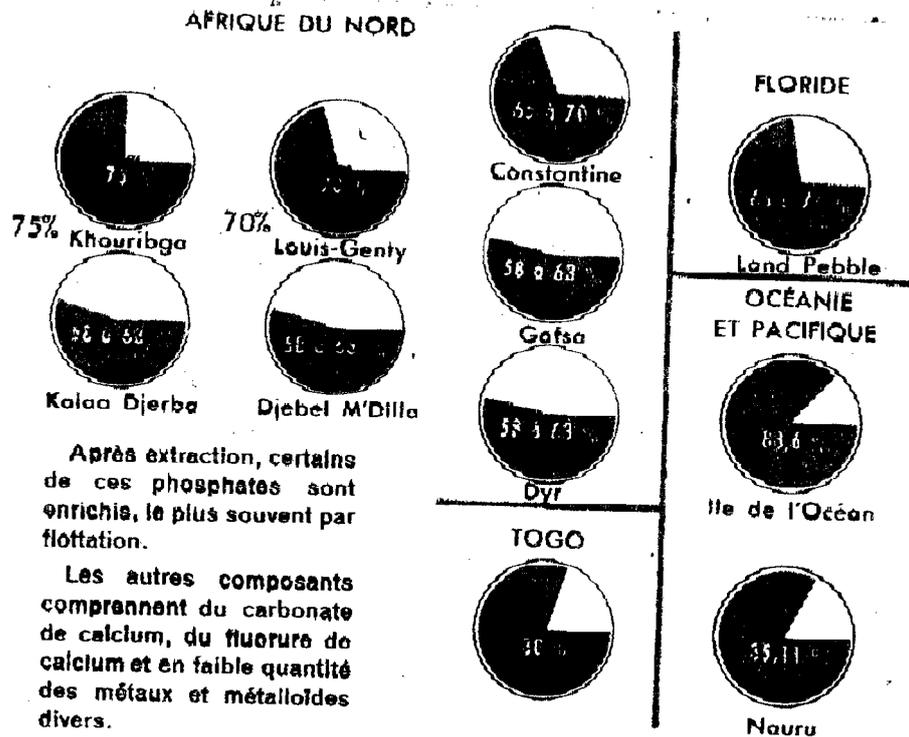
MONDE ENTIER  
 1875 — 505  
 1900 — 3 145  
 1925 —  
 1950 — 8 897

## II- TITRES en PHOSPHATE TRICALCIQUE DES GISEMENTS LES PLUS CONNUS

	milliards de tonnes
AFRIQUE DU NORD ET EGYPTE	24
ETATS-UNIS	13,50
U. R. S. S.	7,50
ILES DU PACIFIQUE ET DE L'OCEAN INDIEN	0,20
	<u>45,20</u>

Ces quantités sont susceptibles d'assurer pendant des siècles, à l'échelle mondiale, les besoins de plus en plus élevés qui résultent du développement de la culture intensive.

Tout récemment, des gisements ont été signalés en Afrique Noire : Togo et Sénégal. Les premiers travaux de recherche indiquent qu'il s'agit de phosphates à haut titre et que ces nouvelles réserves sont importantes. L'exploitation commencera prochainement; on annonce que les extractions atteindront 1.000.000 T. au cours de l'année 1959.



# RÉPARTITION SOMMAIRE DES SOLS, SOUS LE CLIMAT FRANÇAIS

RELATIONS PRATIQUES AVEC LES INDICATIONS DU PH • PLAGE D'UTILISATION DU SUPERPHOSPHATE DE CHAUX

SOLS TRÈS MÉDIOCRES ET DE FAIBLE PRODUCTIVITÉ NATURELLE (PETITE FRACTION DES SOLS AGRICOLES FRANÇAIS)	SOLS GRANITIQUE SCHISTEUX MAL ENTRETENUS ALLUVIONS GRAVELEUSES SOLS SILICEUX	LIMONS IRRÉG <sup>r</sup> MARNÉS TERRES ARGILO-SILICEUSES GÉNÉR <sup>t</sup> BIEN ENTRETENUES	LIMONS NEUTRES OU EN BON ÉTAT ARGILO-CALCAIRES LÉGERS ARGILO-SILICEUX REG <sup>r</sup> MARNÉS	LIMONS NON DÉCALCIFIÉS ET TRÈS BONS ARGILO-CALCAIRES FAIBLEMENT CALCAIRES SILICO-CALCAIRES	SOLS CALCAIRES ± RICHES EN ARGILE OU EN SABLE SILICEUX Y COMPRIS DE NOMBREUSES CRAIES	SOLS CALCAIRES VRAIS	SOLS EXCLUSIVEMENT CALCAIRES PAUVRES
ACIDITÉ FORTE VEGÉTATION TRÈS RÉDUITE ET PAUVRE	ACIDITÉ NETTE	ACIDITÉ MODÉRÉE	ZONE DE NEUTRALITÉ COURANTE RELATIVEMENT INDIFFÉRENTE AUX MARNAGES	ALCALINITÉ NETTE	ALCALINITÉ DE PLUS EN PLUS FORTE	ALCALINITÉ DE PLUS EN PLUS FORTE	ALCALINITÉ TRÈS FORTE RÉDUISANT LA VIGUEUR DE LA VÉGÉTATION
5,5	6,0	6,7	7,2	7,5	8,0	8,5	



LE PH EST AUTANT SOUS L'INFLUENCE DE L'HOMME QUE DU CLIMAT. DE BONS FUMIERS, DE BONS LABOURS, UN ÉCOULEMENT SUFFISANT DES EAUX, CONTRIBUENT, A CÔTÉ DES MARNAGES ET DES ASSOLLEMENTS, A MAINTENIR A UN NIVEAU CONVENABLE LA RÉACTION D'UN SOL BIEN CULTIVÉ

ZONE DECROISSANTE

ZONE DE TRES BONNES CULTURES  
AVEC HAUTES POSSIBILITES DE RENDEMENT

ZONE DECROISSANTE

b - Lessivage : Les pertes sont minimales ; à Versailles, dans les sols de limon, les pertes en  $P_2O_5$  ont été chiffrées à 0,280 kg par hectare et par an.

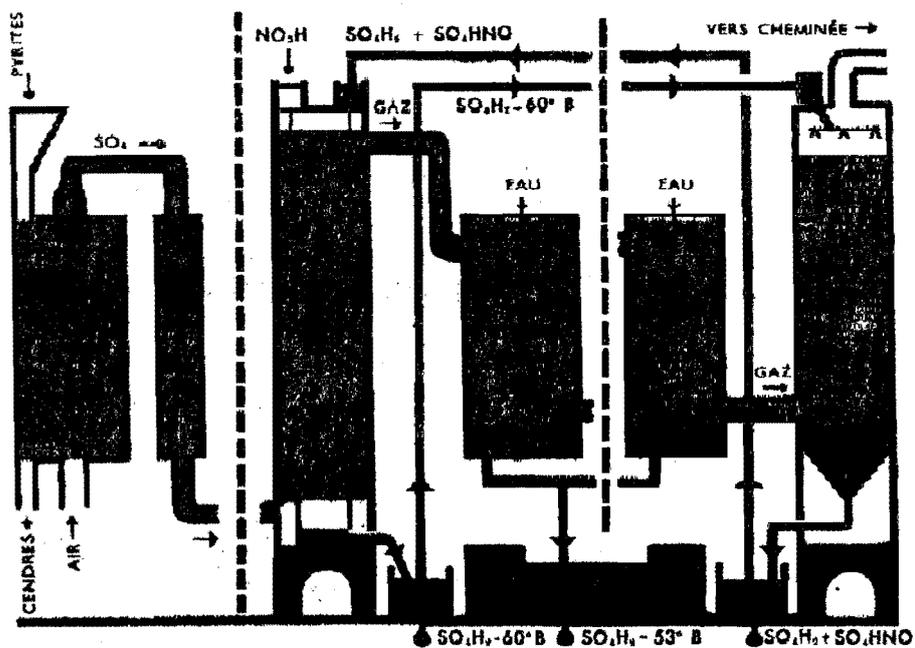
4) - Influence du superphosphate sur la réaction des terres

Une expérience a été réalisée de 1928 à 1948, par la station agronomique de Versailles ; elle portait sur l'évolution du pH et du taux de chaux extractible ; les parcelles étudiées ont été tenues propres et sans cultures et celles avec superphosphate ont reçu chaque année l'équivalent d'une tonne à l'hectare ( fumure dépassant la dose normale). Les résultats ont été les suivants :

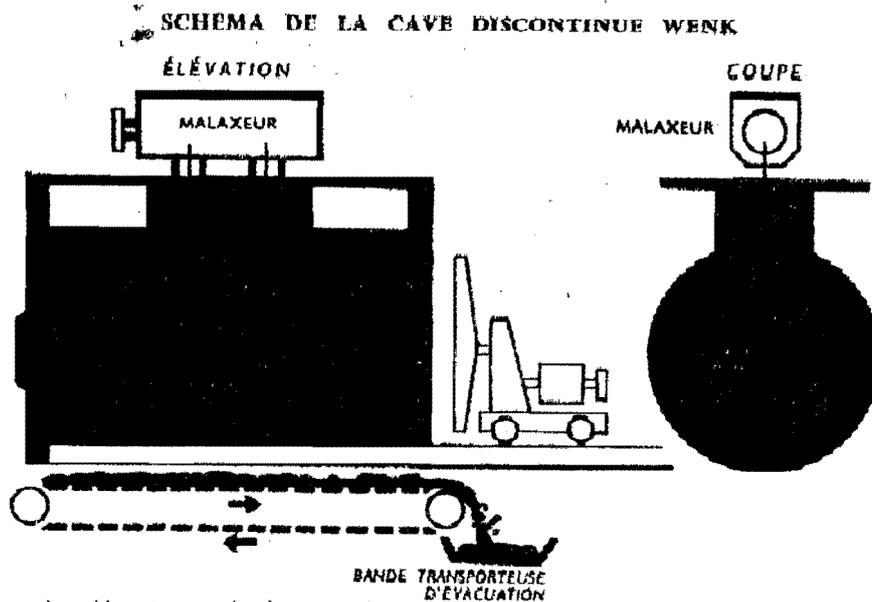
Le pH de la parcelle témoin passe de 6,48 à 6,14 et celui de la parcelle avec phosphore de 6,48 à 6,17.

En ce qui concerne la chaux extractible, les variations sont de 3,61 à 3,21 pour le témoin et de 3,49 à 3,43 avec emploi de superphosphates.

En conclusion, le superphosphate même utilisé à fortes doses, a une faible influence sur la réaction des terres.



FABRICATION DE L'ACIDE SULFURIQUE



La décauseuse s'enfonce mécaniquement dans la cave. Elle porte un disque muni de couteaux animé d'un mouvement circulaire. Le produit tombe par l'ouverture inférieure sur un transporteur à palettes.

La capacité de cette cave peut atteindre 500 tonnes.

Plusieurs facteurs interviennent sur l'efficacité des phosphates naturels :

- 1)- Teneur en  $P_2O_5$ , généralement comprise entre 20 et 38 %.
- 2)- Origine: En effet, certains phosphates naturels sont tendres et se délitent facilement (AFN) car ils sont composés d'organismes minuscules enrobés dans une pâte généralement à base de  $CO_3Ca$  et de  $SO_4Ca$ .
- 3)- La finesse de mouture est un facteur primordial; plus les particules du phosphate naturel sont petites, plus la surface de contact avec le sol est importante. En outre, dans une même masse de sol, la répartition d'une même masse d'engrais est en rapport avec la finesse ce qui augmente les chances de rencontre entre racines et engrais.
- 4)- Influence de la nature du sol plus spécialement en fonction de la valeur du pH. La matière organique joue aussi un rôle; d'une manière générale, elle favorise l'assimilation des éléments fertilisants donc de l'acide phosphorique. En particulier, le vieux humus des prairies acides a une action favorable sur l'assimilation des phosphates naturels; il se forme un véritable superphosphate mais cette action est très lente et ne se produit que dans les sols à forte acidité (pH 5 à 6,2).
- 5)- Rôle des microorganismes - Ces derniers ont besoin d'éléments minéraux, notamment d'acide phosphorique, de chaux et de magnésium. POCHON et ROCHE ont montré que de nombreux micro-organismes sont capables, en milieu riche en éléments organiques (et notamment en sucres) d'attaquer et d'assimiler l'acide phosphorique des nodules de phosphate. Ainsi, l'action de ces micro-organismes s'ajoute à celle de l'acidité naturelle du sol et à celle des excréments racinaires. En outre, le  $CO_2$  dégagé permet une solubilisation surtout en sol humifère et en absence de carbonate de calcium actif.
- 6)- Action des racines - Lorsqu'une racine se trouve en contact avec un grain de phosphate naturel d'apatite les excréments racinaires sont capables de dissoudre une fraction de phosphore ce qui entraîne la formation d'un sillon. Cette action peut être importante car, dans les sols, il peut exister une grande hétérogénéité et certaines zones sont rendues acides par les excréments racinaires. Le phénomène tend à se généraliser dans les vieilles prairies acides.
- 7)- Rôle du climat - Un facteur important correspond à l'intensité des pluies. De nombreux essais ont montré que, les phospho-potassiques étaient plus efficaces sous climat régulièrement humide que sous climat avec sécheresse estivale. Ceci explique par le fait qu'en climat régulièrement humide, d'une part la période d'absorption est plus longue et que d'autre part la perte en calcaire étant plus grande, l'acidification du sol est plus rapide.
- 8)- Interaction Phosphore-potassium - Il n'est pas indifférent que le phosphate naturel soit utilisé seul ou en mélange avec du chlorure de potassium, en effet, il existe des binaires (phosphates naturels + chlorure de potassium) qui sont obtenus par broyage simultané de phosphate naturel et de chlorure de potassium. Les travaux de PAILLUSSEAU ont montré

qu'au cours du broyage, grâce à la chaleur et aux traces d'eau existant dans les matières premières, il se produisait des réactions chimiques, notamment du chlorure de calcium qui contribuait à dégager les grains de phosphate de leur gangue calcaire.

En conclusion, on peut observer le maximum d'action des phosphates naturels dans les conditions suivantes : sol acide, riche en matière organique, sous climat régulièrement humide, ayant une bonne activité biologique, le phosphate naturel étant de préférence utilisé sous forme de binaire avec broyage simultané des deux composants. Ces engrais peuvent servir de fumure de fond mais avec adjonction au cours des premières années de phosphates plus solubles.

**IV - POUDRES d'OS**

**A - Poudre d'Os**

**13 à 20 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et 4 à 5 % N.**

Ils proviennent exclusivement d'os bruts sans aucune addition d'autres matières. De moins en moins employés.

**B - Poudre d'os dégraissée**

La graisse rend plus difficile le broyage et ralentit l'effet fertilisant aussi procède-t'on à un dégraissage par l'eau bouillante, la benzine, ou le sulfure de carbone.

**C - Os dégelatinés**

Os dégraissés chauffés sous pression : l'osséine se transforme en gélatine :

**P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : 28 à 30 % ; N: 0,7 à 1,4 %**

**D - Noir animal**

- Calcination des os en vase clos
- Clarification des jus sucrés en sucrerie

**P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : 20 à 35 % ; N : 0,3 à 3 %**

Les phosphates d'os ont une texture poreuse qui permet des transformations plus rapides que pour les phosphates minéraux ; en outre ils contiennent un peu d'azote. Ils conviennent surtout aux terres pauvres en matière organique et doivent être avant tout enfouis avant l'hiver

**V - PHOSPHATES CALCINES**

Obtenus par calcination de phosphates naturels avec addition de silicates. On détruit ainsi la structure et on obtient des silico-phosphates plus assimilables que les phosphates naturels. Leur composition est la suivante :

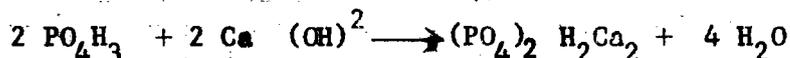
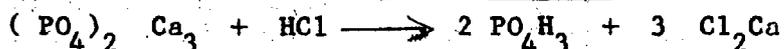
14 à 38 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> dont 18 à 24 % soluble dans une solution de citrate :

CaO .....	35 à 40 %
Na <sub>2</sub> O .....	12 %
K <sub>2</sub> O .....	2 %
SiO <sub>2</sub> .....	10 %

Leur prix de revient est assez élevé par rapport à leur teneur en éléments fertilisants. Ils sont vendus en France sous le nom de basiphosphates, silicophosphates ou thermophosphates.

## VI - PHOSPHATES BICALCIQUES ou PRECIPITES

Ils proviennent d'une attaque de phosphates naturels par HCl.



Du fait de leur très faible solubilité dans l'eau (15-18 mg/litre), ils constituent une forme de choix pour l'agriculteur, car sous cette forme le phosphore est protégé contre la fixation par le sol et conserve une faculté d'utilisation plus prolongée.  $(PO_4)_2 H_2 Ca_2$  est susceptible à la fois d'augmenter le titre en  $P_2 O_5$  de la solution du sol et de se transformer assez lentement pour maintenir son action pendant toute la durée de la végétation.

Il s'agit d'une poudre blanche extrêmement fine (anhydre 52 % de  $P_2 O_5$ ) mais toujours hydratée. Cette forme se rencontre très souvent dans les engrais complexes obtenus par attaque du phosphate naturel à partir de différents acides.

PARMENTIER (1963) a comparé les différentes formes de  $P_2 O_5$  dans les sols de la Champagne : Pour un indice de rendement 100, on obtient :

Phosphate naturel .....	106
Phosphal .....	110
Super .....	117
Bicalcique .....	124

Ce phosphate bicalcique offrirait surtout un avantage pour les cultures à long cycle de développement pendant la période estivale (betterave).

## VII - SCORIES de DEPHOSPHORATION

### A - Fabrication.

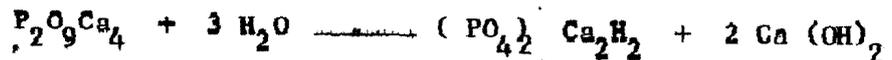
A partir des minerais de fer phosphorés (minette de Lorraine) on obtient une fonte contenant jusqu'à 2,5 % de  $P_2 O_5$  ; au départ, cette teneur rendait la fonte impropre à l'utilisation, cependant l'Anglais Sydney THOMAS en 1878 découvrait un procédé de purification qui depuis est mis en application dans le Bassin Lorrain. Le convertisseur reçoit la fonte en fusion additionnée de 20 % de CaO vive ; l'oxygène à la température de 1800 à 2000 degrés oxyde les impuretés (Si, Mg, C, P). Le phosphore est transformé en acide phosphorique qui se combine à la chaux. Le phosphate calcique se rassemble à la partie supérieure en compagnie de silice et d'oxyde de manganèse. Ce laitier est broyé très finement jusqu'au moment où une quantité de 75 % passe à travers un tamis de 0,76 mm d'ouverture. Actuellement le laitier brusquement refroidi forme des cristaux et donne des scories granulées.

### B - Composition

Les scories THOMAS se présentent sous la forme d'une poudre noirâtre très lourde (100 kg n'occupent qu'un volume de 50 l) qui dose de 14 à 22 % d'acide phosphorique, les dosages les plus courants oscillant entre 16 et 19 %. L'acide phosphorique se trouve dans les scories sous formes spéciales : combinaisons complexes de phosphates et de silico-phosphates correspondant à un mélange de phosphate tétracalcique  $P_2O_5 Ca_4$ , de silice carnatite  $P_2O_5 Ca_4$ , et de  $SiO_2 Ca$ , formes insolubles dans l'eau, mais solubles en grande partie dans les acides faibles, en particulier dans le réactif de WAGNER ; ce dernier doit dissoudre au moins 75 % de l'acide phosphorique des scories. Un quintal de scories contient en outre 50 kg de chaux ; 2 à 5 kg de Mn et de Mg, 2 à 7 g de B et de Cu et des traces de Co et de Mo.

### C - Valeur

Notons que si les phosphates de calcium des scories sont peu solubles dans l'eau, ils subissent néanmoins une légère décomposition ce qui mène le liquide à une concentration voisine de celle du sol (0,5 à 0,2 mg/l.)



Il existe également une formation de phosphosilicate de calcium. L'emploi du réactif de WAGNER quoique donnant une indication sur la vitesse de libération de  $P_2O_5$  a surtout pour but de juger de la valeur des scories entre elles et non d'établir une comparaison d'efficacité avec les autres engrais.

" La digestion " du  $P_2O_5$  se fait d'autant plus rapidement que le pH du sol est faible, d'où l'importance de la date d'épandage en fonction de la nature du sol.

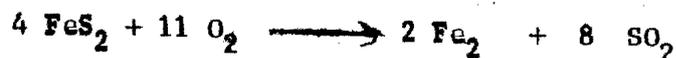
## VIII - LE SUPERPHOSPHATE DE CHAUX

### A - Fabrication

L'industrie du superphosphate repose sur le principe suivant : attaque des phosphates tricalciques par un acide fort, en vue d'obtenir du phosphate monocalcique soluble dans l'eau. La première fabrication industrielle, attribuée à LAWES ingénieur Anglais, date de 1843. Elle mettait en oeuvre l'acide sulfurique et le phosphate minéral. L'industrie française du superphosphate demeure le premier consommateur de phosphates naturels algériens (Constantine) et maronnais (Khouribga). L'industrie du superphosphate est également le premier consommateur d'acide sulfurique, et la préparation de cet acide sulfurique se fait en deux temps :

- Préparation de l'anhydride sulfureux : Différents procédés sont employés :

- Grillage de la pyrite dans les fours :



- Grillage de la blende (SZn)

- Combustion du soufre.

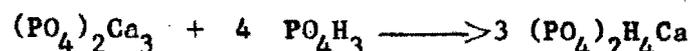
- Oxydation et production d'acide sulfurique suivant deux techniques :

- Procédé des chambres de plomb : la réaction principale est la suivante :  $SO_2 + O + H_2O \longrightarrow SO_4H_2$

- Procédé de contact : le mélange air,  $SO_2$  traverse une caisse de catalyse dans laquelle à des températures de 400-500° et en présence de catalyseur à base de vanadium, se forme  $SO_3$  qui est ensuite absorbé dans des solutions d'acide sulfurique concentré.

### 1) - Fabrication des superphosphates de chaux simples

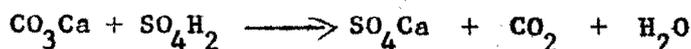
L'attaque du phosphate minéral par l'acide à 53° Beaumé schématisée par les équations suivantes met en évidence deux phases :



soit au total  $3 (PO_4)_2 Ca_3 + 6 SO_4H_2 \longrightarrow 3 (PO_4)_2 H_4 Ca + 6 SO_4Ca$

En fait le produit final contient, outre une légère quantité de phosphate bicalcique, une petite fraction de phosphate tricalcique inattaqué.

Dans le phosphate naturel, il existe du carbonate de calcium celui-ci réagit pour donner du sulfate :

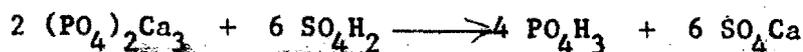


Au cours de la fabrication, la majeure partie du fluor est éliminée à l'état gazeux, par contre les oligoéléments provenant du minéral brut se retrouvent dans l'engrais.

Ces réactions peuvent être réalisées suivant un processus continu ou discontinu et l'on obtient un produit contenant environ 20 % de  $P_2O_5$  soluble dans l'eau et le citrate d'ammonium.

### 2) - Superphosphate de chaux concentré

Il est obtenu en traitant les phosphates naturels par l'acide phosphorique. Cet acide se prépare de la façon suivante :



ensuite la réaction  $(PO_4)_2 Ca_3 + 4 PO_4H_3 \longrightarrow 3 (PO_4)_2 H_4 Ca$  donne un engrais contenant plus de 30 % de  $P_2O_5$ , mais ne contenant pas de soufre.

3) - Superphosphate de chaux ammonié : il est fabriqué en neutralisant, par l'adjonction d'ammoniac, un excès d'acide sulfurique, cette opération diminue la solubilité dans l'eau mais n'abaisse pas la solubilité dans le citrate d'ammoniaque.

## B - Comportement du superphosphate de chaux dans le sol

### 1) - Généralités

L'acide phosphorique contenu dans le superphosphate de chaux se trouve presque en totalité à l'état de phosphate monocalcique. La solubilité du phosphate monocalcique dans l'eau (1,5 g par litre) est respectivement

150 à 1500 fois plus élevée que celle du phosphate bicalcique et du phosphate tricalcique, ce qui correspond à une concentration 1000 fois plus élevée que la titre de la solution du sol.

Par un phénomène d'équilibre, le sol s'oppose énergiquement à un enrichissement trop important de la solution. Seule une fraction du phosphore apporté contribue à l'entretien au relèvement et au maintien du titre de cette solution ; les autres ions  $PO_4$  du phosphate monocalcique dissociés sont aussitôt captés par les particules colloïdales qui les fixent à leur surface et ils constituent une réserve capable de compenser, à chaque instant, les prélèvements effectués par la plante. Ces phénomènes de fixation et de compensation expliquent le fait que, malgré la haute solubilité du phosphate monocalcique, de fortes applications de superphosphate ne donnent lieu à aucune perte.

2)- Variations de comportement en fonction du type de sol

a-Terres argileuses et argilo-siliceuses : Dans ces terres caractérisées par leur forte teneur en colloïdes argileux, les ions  $PO_4$  apportés par les superphosphates de chaux demeurent essentiellement soumis au mouvement incessant des ions, entre la solution et les particules absorbantes du sol. Néanmoins, une fraction peut se trouver emprisonnée entre les feuillets d'argile et être bloquée. En sol neutre, ce blocage n'est pas énergique : des phénomènes alternés d'humification et de dessèchement suffisent à libérer les ions  $PO_4$ . Dans les sols argileux acides, la fixation des ions  $PO_4$  est plus énergique et un emploi de chaux ou de calcaire broyé est nécessaire lors d'un apport de superphosphate à ces sols.

b-Terres calcaires et argilo-calcaires : Le superphosphate de chaux est l'engrais phosphaté par excellence. Sa bonne solubilité assure l'accroissement de l'activité des ions  $PO_4$ .

c-Terres siliceuses : Afin de relever leur niveau de fertilité il suffit d'apporter des quantités d'acide phosphorique inférieures à celles qu'exigeraient des sols argileux ou calcaires présentant un même niveau initial. Des expériences ont montré que des déperditions en phosphore peuvent être redoutées.

d-Terres humiques : Dans ces terres de haute productivité, l'inter-action sol-engrais résultant de la présence d'acide humique favorise grandement la mobilité des ions  $PO_4$  du phosphate monocalcique capables d'assurer, à moindre frais, les besoins des cultures.

En résumé, la zone d'utilisation du superphosphate est schématisée par la figure ci-après.

3)- Rétrogradation et lessivage du superphosphate de chaux

a-Rétrogradation : Il s'agit d'une action physicochimique qui tend à diminuer l'activité des ions  $PO_4$ . Longtemps, on a pensé que l'enrichissement en calcium du phosphate monocalcique favorisait son retour à l'état tricalcique dans les sols calcaires insuffisamment pourvus en argile et en matières humiques. Des études récentes ont permis de montrer qu'il existe de nombreux états de transition gardant pendant un certain temps aux ions  $PO_4$  du phosphate monocalcique une mobilité satisfaisante en sol calcaire. Le blocage des ions  $PO_4$  par Fe et Al des sols acides présentent une intensité variable en fonction de la nature pédologique. Enfin, s'il existe une fixation à l'intérieur des colloïdes argileux, cette fixation dépend essentiellement de la nature des argiles.

### 5)- Apport d'éléments supplémentaires

Un quintal de superphosphate contient environ 28 kg de O Ca, 11,6 kg de S et des oligo-éléments ( Zinc, Fer, Manganèse, Molybdène, Bore).

#### C - Comportement du superphosphate de chaux vis-à-vis des végétaux

Rappelons que l'alimentation phosphatée des plantes dépend essentiellement de trois facteurs : teneur du sol en ions  $PO_4$ , adsorbés, activité et mobilité des ions. L'emploi des isotopes a permis d'affirmer que l'acide phosphorique du superphosphate de chaux est proportionnellement plus actif que celui qui préexiste dans la terre. L'utilisation du phosphore marqué dans les recherches a confirmé qu'autour des particules de superphosphate de chaux dans le sol, se forment des zones dans lesquelles la concentration des ions  $PO_4$  est plus élevée que dans le reste de l'horizon, les plantes prélevant leur acide phosphorique en ces zones. Ce fait se traduit par une prolifération des racelles.

Il est souvent intéressant d'abrèger la durée des premiers stades du cycle végétatif afin de bénéficier d'une maturité précoce. Il s'agit par exemple de pallier aux inconvénients d'un printemps tardif, d'accroître la hâtivité des primeurs, d'obtenir des rendements satisfaisants avec des cultures délicates... On y parvient par une augmentation de la concentration des solutions du sol en particulier par l'emploi du superphosphate de chaux.

Le superphosphate de chaux intervient sur la qualité des produits récoltés. Durant ces six dernières années, des études ont été faites, dans différentes régions de France, sur la qualité de l'herbe des prairies qui recevaient une fumure de superphosphate de chaux. Il a été établi que le superphosphate de chaux augmente la teneur moyenne des fourrages en matières minérales d'environ 7 % et améliore la teneur en acide phosphorique de 22 %. Il existe également une tendance à accroître les teneurs en chaux et en magnésium et à abaisser la teneur en potasse.

#### D - Action bactériostatique du superphosphate de chaux

Actuellement, on utilise de plus en plus le superphosphate de chaux pour modifier le " milieu " et participer à la prévention sanitaire dans les étables, bergeries et poulaillers.

Les maladies contre lesquelles le superphosphate de chaux a une action préventive sont les suivantes : mamite, vaginite, piétin, septicémie...

La dose moyenne à employer correspond à un apport journalier de 100 à 200 g par mètre carré de litière. En outre le superphosphate prévient les dégagements d'ammoniac qui constituent une perte d'azote. Il empêche la volatilisation de l'ammoniac en le neutralisant.

#### E - Emploi du superphosphate de chaux en culture

Le superphosphate peut donc être employé dans des fumures d'entretien ou de redressement, cependant il existe plusieurs possibilités de mode d'apport :

1)- Fumure profonde : elle a pour objet de mettre le superphosphate de chaux dans la couche de terre où l'activité racinaire se montre normalement intense ( Betterave, maïs ).

2)- Fumure superficielle : elle permet de fournir aux racines jeunes, dès leur formation, une quantité importante de  $P_2O_5$  qui, associé à l'azote, provoque un développement radiculaire intense (orge, avoine).

3)- Fumure de couverture : dans le cas des céréales, elle permet d'intensifier le pouvoir de tallage ; dans le cas des prairies, de fournir des éléments qu'il n'est pas possible d'apporter autrement.

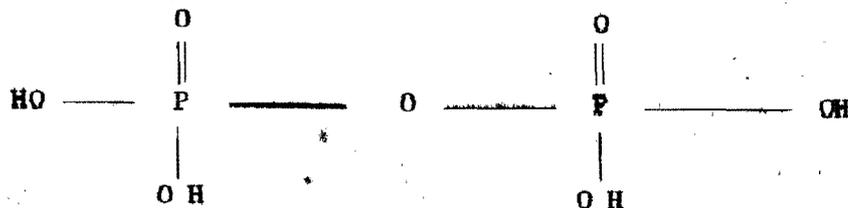
4)- Fumure localisée : en terres très déficientes, la localisation présente des avantages certains, car elle permet d'obtenir rapidement, l'optimum possible de rendement avec le minimum d'acide phosphorique ; elle permet ainsi de limiter les investissements pendant un certain nombre d'années.

## **IX - PHOSPHATES CONDENSES**

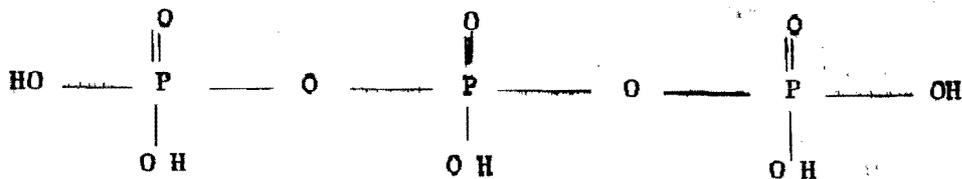
### **A - DEFINITION**

D'après CARPENTIER (1965) les polyphosphates sont des sels des acides polyphosphoriques " constitués de chaînes plus ou moins longues de molécules d'acide orthophosphorique reliées entre elles par perte d'eau."

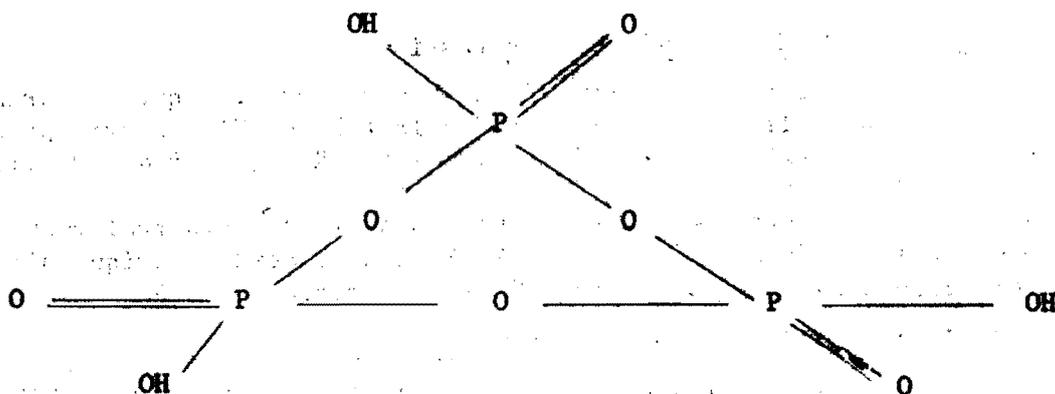
Le premier terme de cette série est l'acide pyrophosphorique :



Le second l'acide tripolyphosphorique :



Lorsque la condensation va plus loin, on obtient des formules cycliques, comme celle de l'acide trimétaphosphorique :



On considère généralement que les métaphosphates désignent le groupe particulier de phosphates condensés à formule cyclique. Leur formule générale est  $Me_n (P_n O_{3n})$ , dans laquelle  $n$  est assez petit. L'usage commercial appelle " métaphosphates " les phosphates condensés les plus courants, parce que leurs formules se rapprochent de  $Me_n (P_n O_{3n})$ , encore qu'ils soient parfois constitués de longues chaînes. Les principaux produits ayant une certaine importance agricole sont les métaphosphates de calcium, de potassium, et d'ammonium.

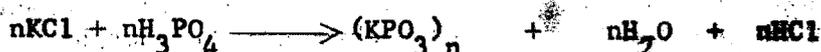
On rencontre aussi des phosphates condensés lorsque l'on emploie " l'acide superphosphorique " dans la fabrication des engrais liquides. Plus la proportion de  $P_2O_5$  de l'acide augmente, plus s'accroît celle des polyphosphates dans les produits obtenus. Avec de l'acide à 75 %  $P_2O_5$ , 50 % de celui-ci est sous forme d'acide polyphosphorique, ce qui donne après ammoniation un engrais liquide, dont 45 % du phosphore se trouve sous forme de polyphosphates.

#### B - FABRICATION

1) - A partir de phosphore élémentaire, il s'agit de brûler du phosphore élémentaire obtenu au four électrique,  $P_2O_5$  étant ensuite mis en présence de différents produits : phosphate naturel, ammoniac ou un sel d'ammonium.

2) - A partir d'acide phosphorique obtenu par voie humide. Plusieurs procédés utilisant l'acide phosphorique obtenu par voie humide existent ou sont étudiés, en vue de pallier au prix de revient élevé inhérent aux grosses dépenses d'énergie nécessaires pour produire du phosphore élémentaire.

Le procédé le plus connu repose sur la réaction :



Son principe consiste à déposer un film d'une bouillie de  $KCl + H_3PO_4$  sur un lit roulant de granulés, la température optimale se situe aux environs de  $480^\circ - 500^\circ C$ .

#### C - COMPOSITION et PROPRIETES

1) - Métaphosphate de calcium :

Cet engrais renferme de 63 à 65 % de  $P_2O_5$  déterminé par extraction d'une solution d'acides nitrique et chlorhydrique, 23 à 27 %  $CaO$ , 5 à 8 %  $SiO_2$ , 1 à 1,5 %  $Fe_2O_3$  et 1,5 à 2 %  $Al_2O_3$ . Se présentant sous forme vitreuse, il est soluble à raison de 98-99 % dans le citrate d'ammoniac neutre.

## 2) - Métaphosphate de potassium :

Il s'agit d'un produit sec, non hygroscopique, ne prenant pas en masse, donc facile à stocker et s'écoulant bien. Il renferme près de 100 % d'éléments nutritifs :  $58\% \text{ P}_2\text{O}_5$ ,  $36-38\% \text{ K}_2\text{O}$ , 1 à 4 % de Cl.

- Engrais très peu soluble dans l'eau mais renfermant 5 % de phosphore soluble dans l'eau, 50 % soluble dans l'acide citrique dilué à 2 %, mais jusqu'à 90 % soluble dans l'acide citrique en excès.

## 3) - Métaphosphate d'ammoniaque :

C'est un produit amorphe, floconneux, blanc, contenant 90 % d'éléments nutritifs ( $73\% \text{ P}_2\text{O}_5$ ,  $17\% \text{ N}$ ). Il est constitué d'un mélange de 70-75 % de métaphosphate d'ammonium ( $\text{NH}_4\text{PO}_3$ ), de 10-20 % d'acide phosphorotritrique ( $\text{H}_3\text{PO}_3$ ) et de 10-15 % de phosphorotritridate d'ammonium ( $\text{NH}_4\text{PO}_3\text{H}$ ). Il se dissout lentement dans l'eau et il est presque entièrement soluble dans le citrate d'ammoniaque neutre.

4) - En ce qui concerne les engrais liquides, avec de l'acide à 78-80 % de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , on peut fabriquer un binaire 11-37-0 renfermant 70 % de  $\text{P}_2\text{O}_5$  sous forme de polyphosphate. La solubilité maxima d'une solution phospho-azotée se situe à 39 % dans un système à base d'orthophosphate à 46 % avec 45 % de polyphosphate et à 48 % avec 70 % de polyphosphate.

## D - EVOLUTION DANS LES SOLS

### 1) - Dégradation et Hydrolyse

La dégradation des polyphosphates a lieu suivant trois processus : séparation des groupes chimiques aux extrémités de la chaîne, scission au hasard le long de la chaîne et formation de produits de dégradation comportant des composés cycliques, du tripolyphosphate, des pyrophosphates et des orthophosphates.

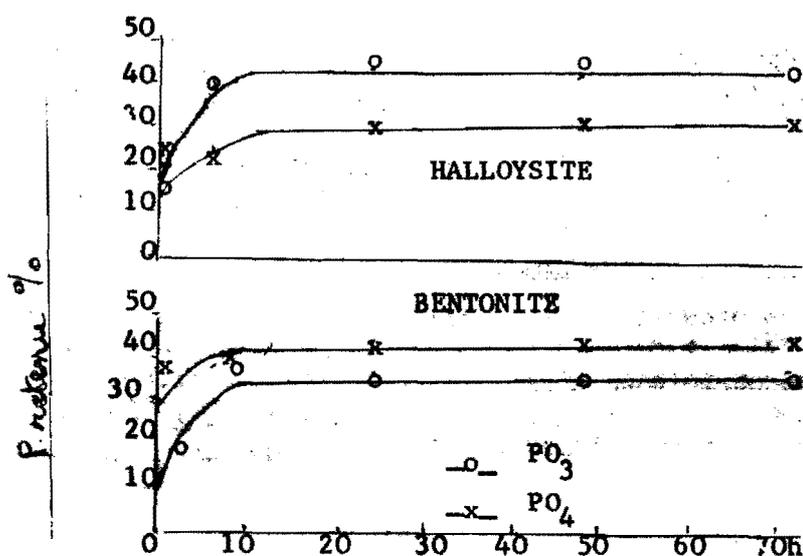
Dans le sol, l'hydrolyse des pyrophosphates dépend de l'activité biologique du milieu et du pH.

Des auteurs américains ont suivi les transformations subies par les pastilles de métaphosphate vitreux (M.P.C.) placées dans un sol légèrement alcalin humidifié : au bout de deux heures, il se forme une zone blanche humide à 2-3 mm de la périphérie de la pastille. Cette zone s'étend à 7 mm au bout de 3 jours, cependant que le volume de la pastille a un peu diminué. Ensuite, il n'y a plus de migration. Au bout de 50 jours ou de 120 jours, les pastilles ne renferment plus de (MPC) vitreux et leurs emplacements sont entourés d'une gangue de "ciment" de 2 à 3 mm d'épaisseur, d'apparence vitreuse, sans doute formée par le "concrét" déshydraté. Le phosphate restant est surtout sous forme de pyrophosphate et de phosphate condensé, mais très peu d'orthophosphate. Il semble que MPC libère ses éléments nutritifs dans le sol par dissolution et hydrolyse, plutôt que par dissolution lente sans changement de composition.

En ce qui concerne MPK, son hydrolyse est mal connue, mais il se forme sans doute des produits à chaînes courtes, notamment des pyrophosphates et des tripolyphosphates.

### 2) - Fixation

Nous avons indiqué ci-dessus qu'un phosphate condensé pouvait s'hydrolyser au contact du sol. Mais les particules peuvent aussi exercer un effet fixateur. A ce sujet, des études ont été faites sur le pouvoir de rétention de certains minéraux argileux vis-à-vis des ions phosphorés présents sous forme condensée. Le maximum de rétention est obtenu après 24 heures et il semble que la bentonite retienne davantage de  $\text{PO}_4$  et l'hallowysite plus de  $\text{PO}_3$ .



Rétention de P de  $(KPO_3)_n$  et  $KH_2PO_4$  par la bentonite et l'halloysite en fonction du temps de contact.

#### E - UTILISATION par les VEGETAUX

##### 1) Absorption par les plantes

Des plantes de maïs cultivées pendant 30 jours en solution nutritive étendue contenant 10 mg/MPK/l ont une végétation normale. De même, des tests de 24 heures sur maïs et tomates cultivés en solution nutritive montrent que P du tripolyphosphate de potassium peut être utilisé par la plante.

##### 2) Action sur les rendements des cultures

a) - Métaphosphate de calcium : En France, des essais déjà anciens ont montré que MPC cristallin est presque inefficace, cependant que MPC vitreux agit dès la première année en sol calcaire.

b) - Métaphosphate de potassium : Cet engrais a aussi fait l'objet de nombreuses études dans différentes parties du monde :

Dans l'ensemble l'action de MPK est équivalente à celle du superphosphate et aux autres phosphates solubles.

Plusieurs facteurs, en particulier le pH du sol, exercent une influence sur l'efficacité de MPK. Ainsi en Allemagne, sur sable limoneux acide (pH 5), le phosphate monocalcique a été plus efficace sur avoir que MPK la première année, l'arrière-action marquant la même tendance. Par contre, à pH 6,7 on n'observe pas de différence.

c) - Métaphosphate d'ammonium : MPA a été surtout étudié aux Etats-Unis, où sa bonne valeur agronomique a été constatée en serre sur sorgho, trèfle violet et ray-grass. En limon sableux et rendzine calcaire MPA s'est montré équivalent au superphosphate sur différentes plantes.

En début de végétation, les phosphates condensés fournissent en général moins de phosphore à la plante que le superphosphate, Par exemp.

c'est le cas de MPK, mais on observe que par la suite la différence diminue et ne se répercute pas ou peu sur les rendements.

En ce qui concerne les dates d'application, il faudra donc tenir compte de la vitesse plus réduite d'action des phosphates condensés.

#### F - RESUME et CONCLUSION

Les phosphates condensés représentent une catégorie complexe de sels. Dans l'ensemble, ces produits offrent l'avantage d'une concentration élevée en éléments nutritifs, donc des possibilités de transport à longue distance relativement économiques. D'autre part, les polyphosphates permettent d'augmenter sensiblement le dosage des engrais liquides renfermant de l'acide phosphorique.

Leur efficacité agronomique a été prouvée par de nombreux travaux qui ont révélé notamment des différences assez faibles entre l'action de chacun d'eux malgré des structures et des compositions très diverses. Néanmoins leur effet peut se faire sentir plus lentement sur les cultures que celui des engrais phosphatés solubles classiques. Ce fait semble indiquer que ces phosphates n'agissent pas directement dans le sol mais après hydrolyse en orthophosphate. Comme cette hydrolyse est surtout fonction de l'activité biologique du sol, il en résulte que la forme offrant la plus grande surface d'attaque sera la plus efficace, c'est-à-dire que les formes pulvérulentes sont à préférer aux formes granulées.

Le pH du sol exerce aussi une influence sur l'action des métaphosphates, action généralement plus faible que celle des superphosphates en sol acide, mais presque équivalente en sol neutre ou alcalin.

Malgré leurs avantages et leur valeur agronomique certaine, ces produits sont pratiquement peu utilisés, pour cela plusieurs raisons : d'abord, si les procédés de fabrication existent, presque aucun d'entre eux n'est encore appliqué à l'échelle industrielle. Ensuite, la plupart d'entre eux, en particulier les métaphosphates de potassium et de calcium sont peu ou ne sont pas solubles dans les réactifs usuels, si bien que leur commercialisation pose le problème préalable de l'adaptation des législations actuelles.

Vème P A R T I E

F E R T I L I S A T I O N P O T A S S I Q U E

CHAPITRE I + POTASSIUM et PLANTE

II - POTASSIUM et SOL

III - ABSORPTION DU POTASSIUM PAR LES PLANTES

IV - DIAGNOSTIC DU MANQUE DE POTASSIUM

V - ENGRAIS POTASSIQUES

VI - PRATIQUE DE LA FUMURE POTASSIQUE

## V° PARTIE : FERTILISATION POTASSIQUE

### CHAPITRE I : POTASSIUM et PLANTE

#### I - ROLES du POTASSIUM

##### A - Constituants des tissus végétaux

Le potassium est un des constituants important de tous les êtres vivants ; les cendres des végétaux en renferment une forte proportion : 20 à 25 %.

Le potassium peut ne pas être considéré comme un élément " plastique " du végétal au même titre que l'azote ou le phosphore ; en effet, alors que ces éléments entrent dans la constitution des tissus végétaux ( protoplasme et noyaux cellulaires) le rôle du potassium est beaucoup plus difficile à discerner. Cependant, il est indispensable à la croissance comme en témoigne la présence d'une quantité élevée dans les organes en voie de croissance.

Le potassium se rencontre chez les végétaux sous des formes diverses et assez mal connues. On le trouve à l'état de combinaisons solubles avec des acides minéraux ou organiques, mais une autre partie est fortement retenue, à l'état non diffusible, par certains constituants cellulaires de la plante vivante.

##### B - Rôles physiologiques

L'importance de ce rôle est connue depuis fort longtemps. Les essais en solutions nutritives ont montré qu'il était impossible d'obtenir un développement normal des plantes dans des solutions insuffisamment pourvues de potassium ; les plantules privées de potassium meurent quelques jours après la levée. Les principaux faits établis expérimentalement sur les mécanismes de l'action de cet élément font apparaître l'intervention du potassium dans un certain nombre de phénomènes physiologiques.

##### 1)- La potasse intervient dans le mécanisme de la photosynthèse

Par sa présence, elle favorise la synthèse des hydrates de carbone ; il existe une relation entre l'utilisation de l'énergie lumineuse par la plante et la potasse, relation mise en évidence par le fait que, suivant divers essais, la fumure potassique serait plus efficace les années de faible insolation. On a remarqué également, dans les pays de luminosité intense, une absorption de la potasse en moindre quantité que dans les pays à luminosité plus faible.

##### 2)- Migration des sucres

Formés au niveau des feuilles, les hydrates de carbone sont acheminés vers les organes de réserve ( fruits, racines, tubercules, grains, etc...) puis stockés. La potasse favorise leur migration et aide à leur concentration en composés plus complexes : amidon, sucre. Pour cette raison les plantes cultivées pour leurs réserves en glucides ( pommes de terre, betterave et vigne) répondent particulièrement bien à l'apport d'engrais potassiques.

### 3)- Synthèse des matières azotées

La potasse favorise l'utilisation de l'azote minéral absorbé par les racines et sa transformation en composés azotés complexes (protéines). La pénurie de potassium en présence de fortes quantités d'azote entraîne l'accumulation dans les plantes d'azote minéral et d'azote organique sous forme non protidique avec possibilité de diminution de rendement. Il existe une liaison étroite entre l'action de l'azote et celle de la potasse et l'équilibre azote/potasse présente une importance particulière dans le cadre d'une fumure rationnelle.

### 4)- Economie de l'eau

La potasse en maintenant la turgescence cellulaire diminue la transpiration de la plante et de ce fait elle permet une économie d'eau dans les tissus ; elle assure donc une meilleure résistance de la plante à la sécheresse. Ceci confirme l'effet particulièrement marqué des engrais potassiques les années sèches. STUDER et BLANCHET (1963) pensent que le potassium exerce une action spécifique sur l'économie de l'eau, mais cette influence du potassium ne s'exercerait que lorsque l'alimentation potassique est excellente et avec un minimum d'alimentation hydrique.

### 5)- Résistance au froid

En élevant la teneur de la sève en éléments minéraux, le potassium augmente la résistance de la plante à la gelée (colza, notamment).

### 6)- Résistance à la verse :

Conjuguée à l'acide phosphorique la potasse favorise le développement des racines et donne une plus grande rigidité aux tissus, assurant ainsi une meilleure résistance des céréales à la verse.

### 7)- Résistance aux maladies cryptogamiques

D'une façon générale on constate que la fumure potassique, lorsqu'elle se traduit par un meilleur développement de la plante, accroît la résistance de celle-ci aux maladies parasitaires. Il s'agit là, vraisemblablement pas d'un effet direct sur les parasites, mais d'une action sur le métabolisme de la plante hôte. Citons à cet égard, les observations de BARBIER, TROCME et LENOIR d'après lesquelles des plantules de betteraves sucrières étaient atteintes de la maladie du pied noir dans la proportion de 10 % dans les parcelles recevant une fumure potassique, alors que la proportion de plantes atteintes s'élevait à 90 % dans les parcelles sans engrais potassiques. Cette action a été signalée également sur la rouille des céréales (le chlorure étant plus actif que le sulfate), l'oidium des céréales, la pourriture noire des choux, la mosaïque du tabac, les chancres des arbres fruitiers, la gale des pommes de terre.

## II - BESOINS DES PLANTES EN K

Les prélèvements en potassium des différentes espèces cultivées présentent de nombreuses fluctuations ; en effet, le pouvoir sélectif des plantes pour le potassium varie largement selon la famille, l'espèce et peut-être la variété. Les graminées en général absorbent plus facilement le potassium que les dicotylédones notamment les légumineuses. D'autre part, les plantes absorbent d'autant plus de potassium que le sol est plus riche et peuvent même en absorber au-delà de leurs besoins (consommation de luxe) phénomène que nous traiterons par ailleurs.

Un tableau dû à BARBIER et TROCME (1962) donne les quantités de  $K_2O$  prélevées par des plantes.

Prélèvement de $K_2O$ en kg. pour des plantes supposées à l'optimum d'alimentation		
Culture	Parties aériennes et racines	Par qt. de graines
Blé par quintal	3,8	0,75
Orge "	3,9	0,9
Avoine "	4,5	0,75
Mais "	2,0	0,5
Colza "	5,0	1,0
Pomme de terre par tonne	7,5	<u>Par t. de racines</u>
Betterave à sucre "	7,0	3,0
Luzerne "	28,0	
Choux "	6,0	

En effet, comme nous le constaterons plus loin l'absorption du potassium par les plantes est régie, par de nombreux facteurs ; en outre, il faut noter que les produits animaux contiennent peu de potasse :

Lait 2 kg de  $K_2O$  par 1 000 litres

Viande 4,5<sup>kg</sup> de  $K_2O$  par 1 000 kg.

Cependant la teneur varie énormément entre les diverses parties du végétal comme l'indique le tableau ci-dessous résultant de nombreuses analyses faites par les stations de l'I.N.R.A.

VEGETAUX		TENEUR EN POTASSE exprimé en g de $K_2O$ dans 100 g. de matière sèche
Blé	Grain	0,35 - 0,7
	Paille	0,5 - 1,5
Orge	Grain	0,5 - 0,66
	Paille	1,2 - 3,0
Pommes de terre	Fanes	1,6 - 4,7
	Tubercules	2,0 - 3,5
Betteraves	Plante entière	1,15 - 2,25

## CHAPITRE II : POTASSIUM et SOL

Il est possible de considérer le K dans le sol sous plusieurs états différents.

### I - POTASSIUM DES MINÉRAUX PRIMAIRES

Un grand nombre de minéraux renferment du potassium : d'après CLARKE, l'écorce terrestre contiendrait en moyenne, 3,2 % de  $K_2O$ . Au cours de la formation des sols, les minéraux primaires des roches mères s'altèrent et le potassium se trouve partiellement libéré ; une part importante de ce potassium reste cependant dans le sol, étant retenue par les colloïdes minéraux et organiques qui se forment. Le sodium moins énergiquement retenu, se comporte de façon différente et se trouve peu à peu éliminé par les eaux de drainage. JENNY (1951) explique par ces considérations l'accumulation relative du potassium dans les sols et celle du sodium dans la mer. COLLIER (1951) étudiant l'altération d'un granite en Auvergne, donne les résultats suivants sur la composition comparée de la roche mère et du sol formé.

	$K_2O$	$Na_2O$
Roche mère	4,4	3,6
Sol	5,7	2,4

Les teneurs différentes en potassium entre les roches mères influent sur les possibilités de libération de ces ions au cours des phénomènes de dégradation ; aussi l'on peut diviser les matériaux originels en deux groupes :

- Roches mères pauvres en K ( roches calcaires)
- Roches où la teneur en potassium est éminemment variable.

Feldspaths alcalins .....	0,5 à 4 %
Feldspath orthose .....	9 à 15 %
Biotite .....	6 à 9 %
Muscovite .....	8 à 11 %
Leucite .....	21 %

#### A- Sols en évolution

L'altération des minéraux primaires permet de déterminer la potentialité des sols suivant leur degré d'évolution. Incontestablement les sols situés sur arènes granitiques peuvent mettre du K à la disposition des plantes ; ceci en quantité d'autant plus importante que l'augmentation de l'activité biologique entraîne une augmentation de la décomposition, car on assiste à une hydratation des minéraux primitifs avec perte de K ( cf. cours de pédologie) ; la transformation de la muscovite en illite met à la disposition des végétaux une quantité appréciable de K.

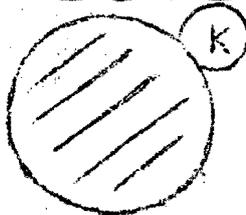
## B - Sols évolués

Les argiles résiduelles ou de néoformation peuvent libérer ou fixer du K en fonction de leur nature ; les plus actives correspondent aux illites et aux argiles illitiques dégradées ou " orientées " ces dernières possédant un degré d'hydratation et un pouvoir de fixation de K supérieur aux illites strictes. Enfin, dans ces sols évolués certaines excretions racinaires permettent la destruction de l'édifice cristallin des silicates avec libération du potassium.

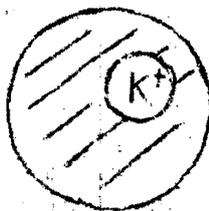
### II - POTASSIUM ET MATIERE ORGANIQUE

Les résidus végétaux et animaux renferment toujours une certaine quantité de potassium. Celui-ci se trouve sous des formes facilement solubles à l'eau et rentrant rapidement dans le cycle de l'alimentation des végétaux comme en témoignent les schémas suivants :

Complexe argilo-humique riche en humus :  
L'ion K reste fixé en surface des colloïdes humiques.



Complexe argilo-humique pauvre en humus :  
L'ion K pénètre à l'intérieur.



Les microorganismes sont susceptibles de stocker dans les tissus, au cours de leur prolifération, une certaine quantité de potassium. Cette fixation n'est que provisoire et n'entraîne aucune concurrence avec l'alimentation des plantes supérieures. Enfin, signalons que la matière organique en voie d'humification donne naissance à des " substances de croissance " stimulant l'alimentation minérale de la plante et particulièrement l'absorption du potassium.

### III - POTASSIUM ECHANGEABLE

#### A - Généralités

Les colloïdes minéraux et organiques du sol, chargés d'électricité négative, attirent et retiennent les ions positifs ou cations en quantité d'autant plus grande que leur surface spécifique est plus développée. Les cations ainsi retenus demeurent échangeables, en totalité pour certains (Ca), en partie seulement pour d'autres, parmi lesquels le potassium (conf. cours d'agronomie). Parmi l'ensemble des cations échangeables (H, Ca, K, Mg, Na) le potassium représente une proportion variable selon les sols (de 1/20e à 1/5e environ).

Le potassium échangeable représente la fraction des réserves potassiques du sol la plus apte à alimenter les plantes. Comme il existe des déplacements continus entre les ions K de la solution et une fraction des ions adsorbés aux colloïdes il est difficile de dissocier (au point de vue nutrition des plantes) ces deux fractions, cependant on peut considérer que la teneur en K<sub>2</sub>O des solutions du sol correspond à des quantités voisines de 10-15 kg par hectare.

Les lois quantitatives de l'échange du potassium dans le sol sont analogues à celles des phénomènes d'adsorption. En d'autres termes, au fur et à mesure qu'un sol s'enrichit en potassium échangeable par apport d'engrais potassique, la concentration de la solution en équilibre avec le sol croît très lentement au début, puis de plus en plus rapidement. Dans ces conditions, si l'on applique une faible dose de potassium à un sol fortement carencé, on conçoit que cette fumure ait relativement moins d'influence qu'une dose plus élevée sur l'alimentation potassique de la plante.

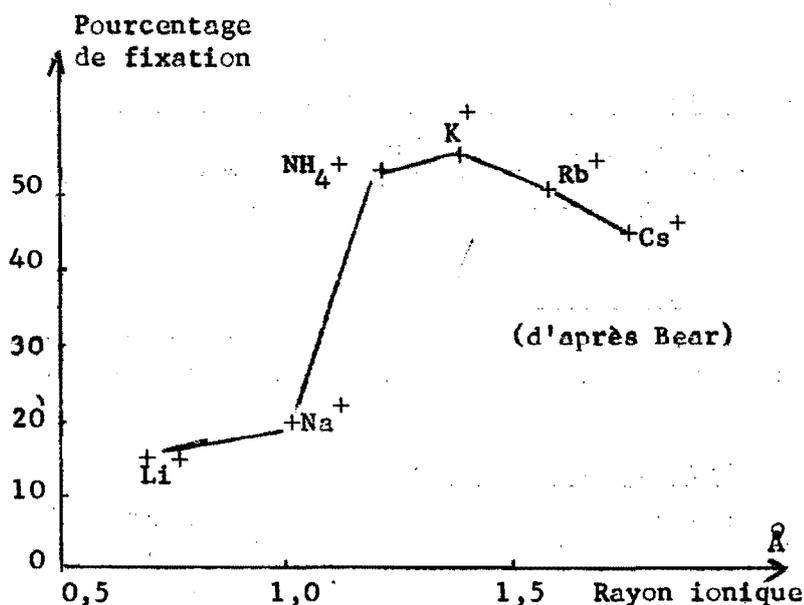
D'autre part, il a été établi que le potassium récemment appliqué au sol est moins énergiquement retenu et, par conséquent plus facilement mis à la disposition de la plante que celui qui préexiste dans le sol. Pour préciser ce point très important quant à ses conséquences agronomiques, supposons le cas de deux sols de même nature renfermant, le premier 0,1 % de K<sub>2</sub>O échangeable et le second 0,15 %. Le stock total de potasse échangeable sera dans le premier cas (en supposant le poids de la couche arable égal à 3 000 tonnes/ha) de 300 kg par hectare et de 450 kg dans le second cas, soit une différence entre les deux sols de 150 kg par hectare. L'addition au premier sol d'une fumure potassique équivalente à 150 kg/ha provoquera dans ce sol une bien meilleure alimentation potassique des cultures que dans le second. Diverses causes peuvent intervenir pour expliquer cette différence, notamment le fait que les engrais soient répartis de façon très hétérogène par un premier labour, et qu'en conséquence les équilibres de rétention de potassium par les colloïdes du sol mettent du temps à s'établir. Il s'ensuit que la fumure potassique d'entretien devra être annuelle pour bénéficier de cette plus-value.

En résumé cette forme de K correspond au potassium diffusible ou isotopiquement diluable dont nous allons étudier la dynamique en détail.

### B - Mécanisme de la fixation

On a établi depuis longtemps, pour la montmorillonite et certains sols, qu'après fixation de K, il y a diminution de la capacité d'échange d'une quantité égale à celle de K fixé. Les ions K sont fixés sur des positions interfeuillet participant normalement aux échanges. Quand l'argile se déshydrate, les feuillets contractent et les ions interfoliaires perdent leur cortège de molécules d'eau prenant un diamètre proche de celui de l'ion non hydraté. Or, les couches externes des feuillets consistent en un arrangement hexagonal d'ions oxygènes laissant entre eux des cavités d'un diamètre de  $2,8 \text{ \AA}$ . Les ions K, dont le diamètre est de  $2,66 \text{ \AA}$  pénétrant dans ces cavités et se trouvent ensuite enfermés solidement entre deux couches consécutives. La configuration réalisée de cette façon est particulièrement stable et résistera à la réhydratation.

Une démonstration du bien fondé de cette conception est donnée par le diagramme suivant. On voit que seuls les ions dont le diamètre est proche de  $2,8 \text{ \AA}$  sont fixés dans une proportion appréciable : les ions plus gros ne peuvent entrer dans les cavités, les ions trop petits ne peuvent stabiliser suffisamment la configuration obtenue.



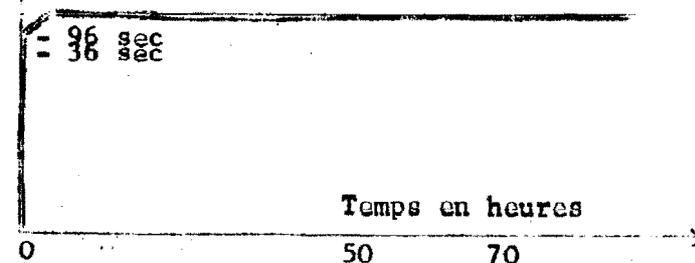
D'autres mécanismes doivent être invoqués pour la fixation par la vermiculite, l'illite : abondance de charges tétraédriques par suite de substitutions de Al à Si par rapport aux charges octaédriques : or les charges tétraédriques exercent une attraction plus forte puisqu'inversement proportionnelles au carré de la distance. Enfin certains auteurs, SCOTT et al., CARTER et al. etc... pensent que l'aluminium n'est pas étranger au phénomène. En milieu acide, il y a formation d'Al échangeable, ce qui conduit à l'augmentation du nombre de sites internes d'échanges. En milieu neutre, il y a formation de précipités d'Al (OH)<sub>3</sub> qui peuvent empêcher la fixation de K comme la libération de K préalablement fixé.

### C - Etude des lois d'échange par dilution isotopique

Par dilution isotopique il est possible de déterminer le K échangeable autodiffusible ou assimilable; en effet, l'emploi d'ions  $^{42}\text{K}$  se diluant isotopiquement avec les ions  $^{39}\text{K}$  a permis de constater la grande mobilité des ions K dans les sols.

L'équilibre de dilution isotopique est très court; à noter cependant que les mouvements se poursuivent même si le système est à l'équilibre, chaque ion K passant une <sup>petite</sup> partie de son temps dans la solution libre et la plus grande partie dans la couche diffuse.

K isotopiquement  
↑ dilué p.p.m. de terre



( d'après BARBIER )

Notons que les échanges entre K et le complexe absorbant sont soumis aux lois classiques régissant cet équilibre.

#### 1)- Relations entre cation monovalent et bivalent

Le lessivage entraînant une plus grande quantité de monovalent que de bivalent, à Versailles, d'après DEMOLON, on a constaté que 1,39 % du Ca et 2,60 % de K initialement présents dans les sols sont lessivés annuellement.

#### 2)- Taux de saturation

Pour une même concentration en Ca de la solution du sol, la concentration en K est proportionnelle au taux de saturation en K du complexe absorbant.

#### 3)- Nature des colloïdes :

Les colloïdes à forte capacité d'échange absorbent relativement plus de Ca<sup>++</sup> et moins de K<sup>+</sup> que ceux possédant une faible valeur de T.

Montmorillonite → Illite → Kaolinite

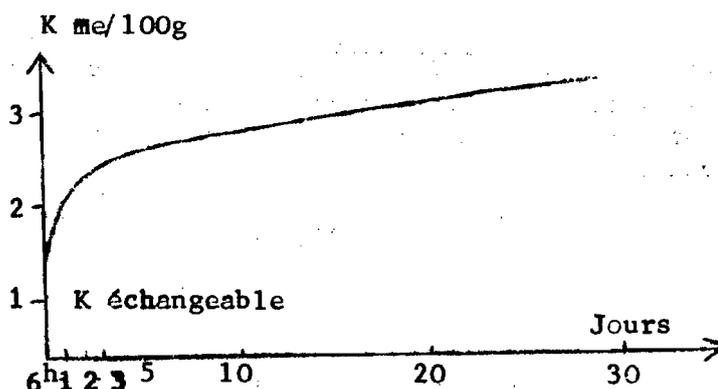
#### 4)- Nature des sites d'échange

Il existe un coefficient K d'échangeabilité variant avec les types de position d'échange ( DUTHION , 1966). Le coefficient d'échange va croissant des sites externes aux sites présents sur les bords des réseaux pour atteindre un minimum avec les sites interfoliaires.

Ce fait peut être matérialisé par la représentation de la dilution isotopique en fonction du temps, représentation montrant une branche presque verticale suivie d'une branche presque horizontale mais qui supporte encore, avec une probabilité de 84 % l'hypothèse d'être lentement ascendante. Ce fait voudrait dire que les ions K marqués continuent à se diluer, mais très lentement, dans un volume d'ions K préexistants croissant. Ceci est à rapprocher d'une autre constatation; des sols très différents, agités

pendant 24 heures avec une solution contenant 1,2 K, ont montré un taux de potassium isotopiquement dilué toujours supérieur à celui de K échangeable déterminé chimiquement.

D'autre part si un sol de limon argileux est mis en contact pendant des temps croissants avec une simple solution d'échange contenant du tétraphénylborate de sodium, la courbe représentant les quantités extraites, en fonction du temps, a la forme ci-dessous :



Quantité de potassium libéré en fonction du temps

On constate qu'au delà de la quantité représentant le K échangeable de ce sol, on n'observe aucun point de rupture, prouvant ainsi que l'échange est bien progressif.

Plutôt qu'une différenciation entre les formes il existe à l'intérieur même de chaque forme des variations dans la facilité de remplacement de K. Dans la pratique, fixation et libération se limitent mutuellement. Cependant le K interfeuillet ne répond pas à la moindre variation du K échangeable, il faut un abaissement notable sans pour autant aller jusqu'à la nécessité de l'absence totale de K car il existe des phénomènes de diffusion.

#### D - Intensité du mécanisme de rétrogradation

On donne ce nom au passage du potassium échangeable à l'état non échangeable. Ce phénomène désigné ailleurs par fixation temporaire est d'intensité variable suivant la richesse initiale des sols en potasse, et la nature de l'argile qu'ils renferment ; le potassium "rétrogradé" peut varier de 0 à 90 % d'une quantité ajoutée sous forme minérale soluble.

##### 1)- Influence de la nature de l'argile

Le mécanisme du phénomène est lié à la structure cristalline de l'argile ( Franc de FERRIERE, 1963).

a)-Type illite : Suivant le schéma concernant la disposition des feuillets d'argile, on distingue 3 formes d'ions K :

- Ions  $K^+$  jouant le rôle de tenons pour maintenir les feuillets élémentaires. Ce sont des ions complètement inassimilables.
- Au contraire, les ions K situés à l'entrée des interstices présentent une assimilabilité réduite par les plantes. Cette fixation n'est pas complètement irréversible surtout en année pluvieuse ; à l'inverse la sécheresse en refermant les fentes entrouvertes de phyllites accentue la rétrogradation de  $K_2O$ .
- Enfin un véritable nuage d'ions K, restant retenu par simple adsorption superficielle est très facilement échangeable.

Ce sont des sols où les cultures peuvent se développer plusieurs années, sans fumures potassiques, même si la récolte s'affaiblit. Cependant, pour maintenir dans un état d'assimilabilité assez important les ions K, il est nécessaire d'apporter des engrais. Les argiles du type "illite" prédominent en France, surtout dans les sols de limon des plateaux.

b)- Type chlorite : Surtout rencontré dans les sols de schistes de l'Ouest de la France. Pas de rétention, uniquement K extérieur, car entre les feuillets se trouve une couche de brucite magnésienne qui occupe toute l'épaisseur des fentes interfoliaires. Il existe donc une grande possibilité de lessivage.

On constatera une réponse très différente entre Chlorite et Illite ; dans le <sup>premier</sup> cas les apports d'engrais marquent considérablement, dans le second, les ions K sont employés à " boucher les trous " à l'entrée des interstices.

c)- Type montmorillonite : Entre les feuillets d'argile on remarque de larges ouvertures remplies par des couches d'eau orientées plus ou moins riches en cations bivalents Mg, Ca et pauvres en K. Cette argile assure difficilement l'alimentation potassique des plantes de culture. Dans les sols illito-montmorillonitiques les engrais potassiques doivent être apportés en particulière abondance pour compenser le très fort pouvoir de rétention des ions K par l'argile dans les fentes largement ouvertes et pour parer au déséquilibre K/Ca toujours important.

d)- Type vermiculite : Cette argile typique des sols lessivés et podzoliques provient d'illite ayant perdu ses tenons K et remplacés par des ions H<sup>+</sup>. Elle peut également provenir de chlorite ayant perdu sa brucite interfoliaire remplacée par des couches d'eau orientée acide. En résumé, il existe une carence en ions K très importante, Il faudra donc, à la fois procéder à un chaulage pour remplacer les ions H inclus dans les fentes interfoliaires de la vermiculite, et à un apport important de K sous forme de bicarbonate de K afin d'éviter l'acidité d'échange.

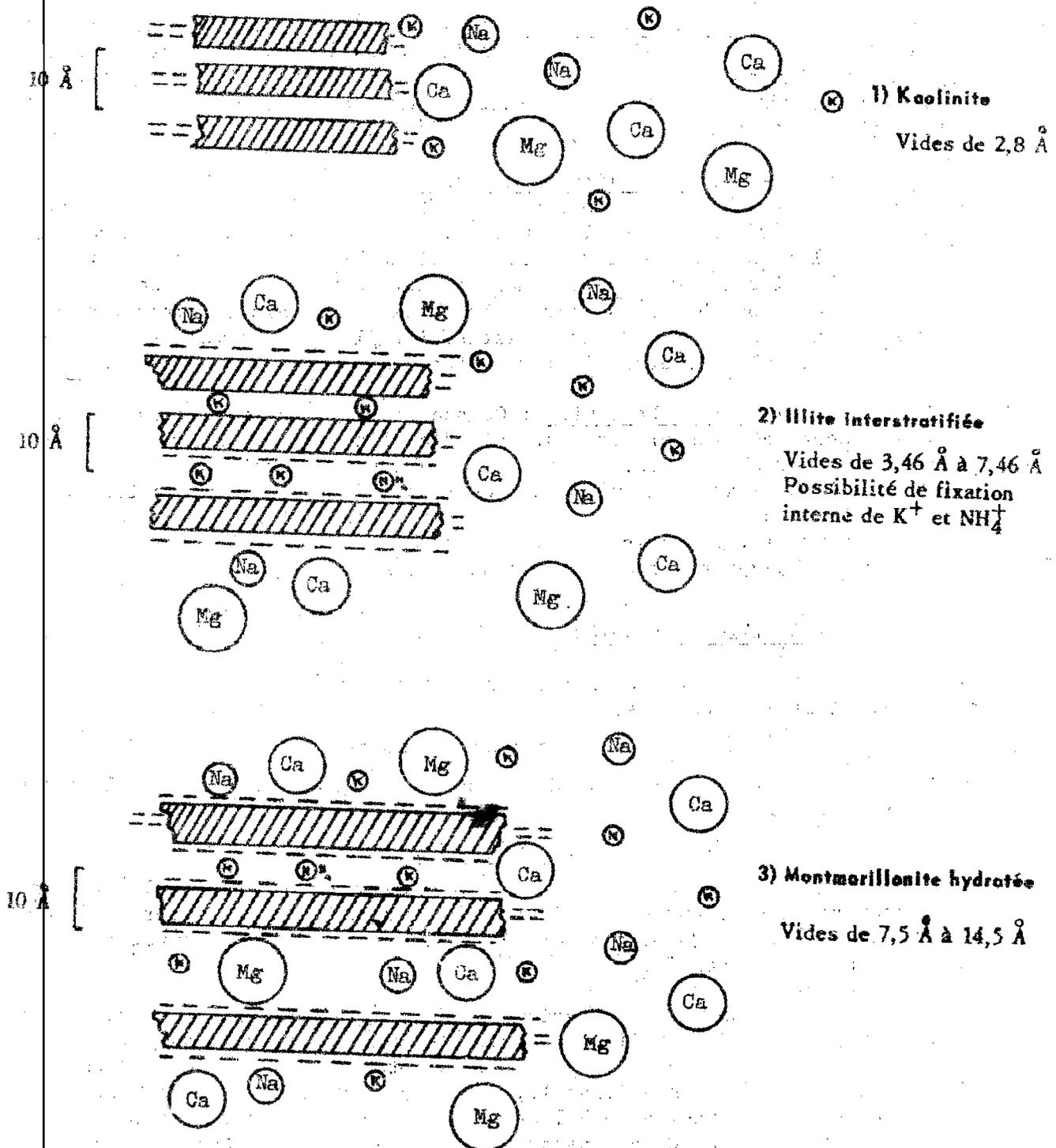
e)- Type kaolinite : Cette argile néoformée peut être considérée comme le produit résiduaire d'argiles micacées ayant subi une action éluviale extrêmement intense, elle est très pauvre en tous éléments minéraux de base et oligoéléments. Aussi l'apport du seul potassium dans ces sols acides accentue parfois le déséquilibre vis-à-vis d'autres éléments encore plus déficients. Si l'on complète cette fertilisation par un amendement calcaire, on accentue également les carences. En résumé, il est indispensable pour une remise en culture d'apporter, soit du fumier de ferme, soit des engrais spéciaux riches en oligoéléments.

## 2)- Influence du type des sols

a)- Rendzines : La Champagne est la région ayant aujourd'hui la plus grosse consommation de potasse à l'hectare. Les argiles de ces sols sont essentiellement variées : mélange d'illite, montmorillonite, chlorite. Ici, la nature de l'argile importe peu, c'est l'extrême abondance du calcaire représentant 75 % du sol dont l'action est prédominante. Les phyllites argileuses sont entourées d'un épais nuage d'ions Ca<sup>++</sup> qui rend difficile la rétention des ions K<sup>+</sup> apportés par les fumures potassiques. Ceux-ci sont donc très facilement assimilés par les racines des plantes et aussi facilement entraînés en profondeur par les eaux de pluie dans ces sols perméables.

Les ions dont le diamètre est inférieur à l'épaisseur de ces vides peuvent y pénétrer et y cheminer.

L'ion potassium ( $2,66 \text{ \AA}$ ) peut ainsi être "fixé" à l'intérieur de certaines argiles, où ne peuvent s'introduire  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  beaucoup plus volumineux.



b)- Sols bruns : Décalcifiés, peu ou pas lessivés, ils peuvent contenir comme les rendzines, des argiles illitiques, chloritiques ou montmorillonitiques ; mais ici les ions K ne se trouvent pas en présence d'autres cations en trop grande abondance, comme dans les rendzines calcaires ; l'influence des divers types d'argiles présentant une plus ou moins grande faculté de fixer les ions K, dans leurs fentes, soit ouvertes, soit fermées, joue donc ici un rôle prédominant. Cela est très visible dans les sols bruns sur schistes métamorphiques à chlorite de l'Ouest de la France, et dans les sols montmorillonitiques de la région Tourangelle.

c)- Sols bruns lessivés : Partiellement ou totalement privés de chlorite et de montmorillonite et enrichis en illite, ils sont les sols typiques des limons des plateaux de la région parisienne. Leurs besoins en potasse sont élevés en raison d'une fixation importante des ions K des engrais, à l'entrée des interstices entrouverts de l'illite.

d)- Sols podzoliques et podzols : Ils présentent des argiles aux fentes ouvertes par élimination des tenons K de l'illite ou de la brucite des espaces interfoliaires de la chlorite ; ce sont des argiles vermiculitiques aux fentes pleines d'eau orientée riche en ions H<sup>+</sup> acides. Leur besoin en ions K est particulièrement élevé, mais il est indispensable de saturer une partie de leurs ions H<sup>+</sup> acides, par de la chaux ou du calcaire broyé, afin de permettre aux ions K des engrais de satisfaire plus directement les besoins des plantes de culture. Seule la forme bicarbonate de potasse est à conseiller.

e)- Sols à kaolinite : Ce sont des sols pédologiquement plus lessivés encore que les précédents, mais dont l'argile ne présente pas de fentes interfoliaires ouvertes. Ils sont incapables de fournir des ions K aux plantes, mais ne fixent pas non plus les ions K des engrais potassiques, ce qui limite les besoins en potasse de tels sols. Du fait de leur extrême pauvreté naturelle, ces sols ont une vocation forestière plutôt qu'agricole et ne portent en général que des bois médiocres.

#### E - Equilibre dans les sols

Il ne faut pas oublier que ces phénomènes d'échanges sont régis par plusieurs facteurs.

##### 1)- Influence de la teneur en humus

Comme nous l'avons déjà mentionné une augmentation de la teneur en humus freine les phénomènes de rétrogradation.

##### 2)- Influence du niveau de richesse en potassium

Le phénomène de rétrogradation dépend également de la richesse en potassium du sol. Lorsque celle-ci est élevée, les sites inter-folliculaires susceptibles de fixer du potassium sont tous occupés, et une nouvelle rétrogradation n'est plus possible.

Le passage du potassium à l'état non échangeable se traduit par une diminution de la " mobilité " de cet élément et, par conséquent, de son assimilabilité par la plante. Toutefois, la potasse rétrogradée ne doit pas être considérée comme non utilisable, car le phénomène est réversible. Le passage de l'état non échangeable à l'état échangeable ou " régénération " a lieu dans les sols en place. On a constaté que la quantité de potasse exportée par une récolte peut dépasser fortement, jusqu'à cinq fois en vases de végétation, celle correspondant à la diminution de la teneur du sol en potassium échangeable.

En résumé, l'évolution du potassium de la forme échangeable à la forme non échangeable et l'évolution inverse, se limitent mutuellement. A la suite d'une fumure potassique, la rétrogradation est possible ; par contre, l'appauvrissement du sol provoqué par l'exportation d'une plante en voie de croissance peut amener le passage du potassium rétrogradé vers la forme échangeable.

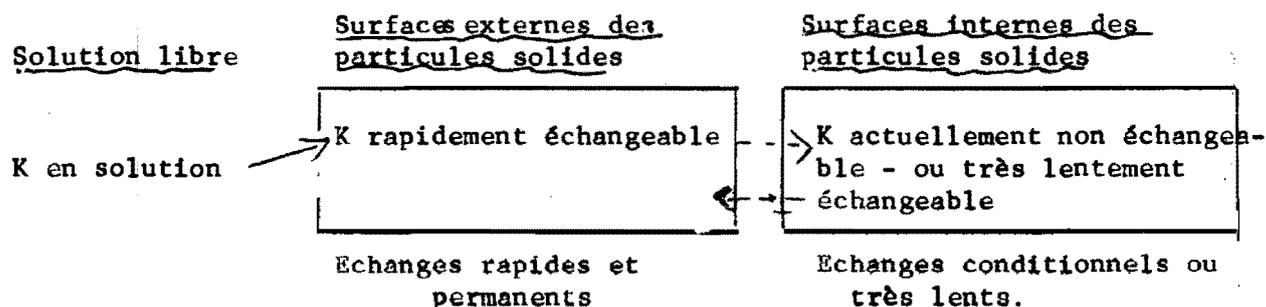
### 3)- Influence de la dessiccation

Si l'on soumet un échantillon de sol imprégné de  $^{42}\text{K}$  à des alternances de dessiccation et d'humectation on constate des variations de la : radioactivité spécifique ( radioactivité /g de K). Cette radioactivité dans la solution finale d'extraction a diminué, alors que la concentration de cette solution en ions K est identique, on a donc assisté au passage d'ions marqués à l'intérieur des feuillets et à la libération d'ions non marqués.

Une simple variation de la tension en vapeur d'eau peut intervenir. En effet, si l'on place le même échantillon de sol sous des tensions en vapeur d'eau différentes, on constate des variations des teneurs en K échangeable ; si l'on inverse les tensions les courbes s'inversent également.

En conclusion: les alternances de dessiccation et d'humidification favorisant les mouvements des feuillets d'argile, accélèrent les phénomènes de rétrogradation et de régénération.

L'ensemble des phénomènes observés peut être résumé par les schémas suivants :



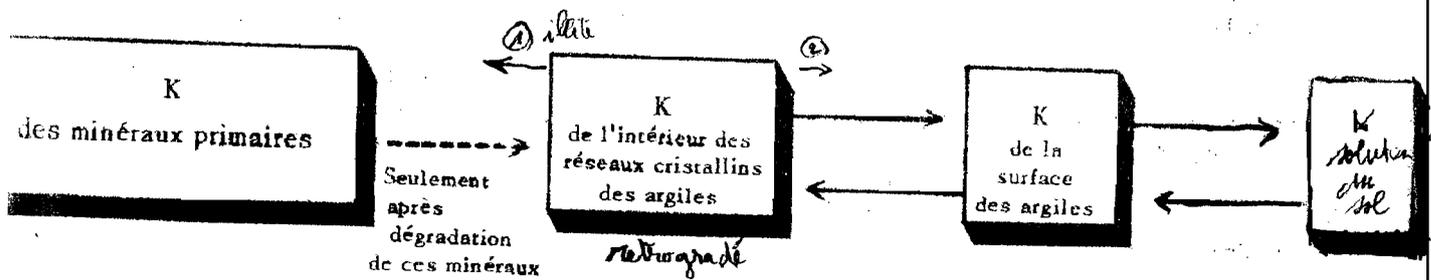
D'après BARBIER (1961) la double flèche de droite, en traits discontinus, indique que la diffusion des ions n'a lieu, du moins avec une vitesse appréciable, qu'en certaines circonstances, par exemple au cours d'alternances de dessiccations et d'humectations, pendant lesquelles des communications s'établissent entre des pores internes et l'extérieur. Si l'on a récemment chargé l'extérieur en ions K ( par application d'engrais potassiques) l'ouverture des portes de communication fait pénétrer, à l'intérieur, plus d'ions K qu'il n'en sort, et un supplément d'ions K restera emprisonné après refermeture des portes. Au contraire, si l'on a récemment extrait des ions K de l'extérieur, l'ouverture des portes provoque un retour partiel à l'extérieur des ions K antérieurement emprisonnés. En d'autres termes, les trois groupes d'ions K représentés augmentent ou diminuent parallèlement, mais avec un retard pour le groupe de droite, retard qui peut probablement atteindre plusieurs années dans le sol en place. Ce groupe finit par se mettre en équilibre avec les ions K de l'extérieur, par étapes, ou très lentement.

L'emploi d'isotopes a permis de démontrer que les mouvements simultanés d'entrée et de sortie d'ions K sont bien réels, toute rétrogradation de potassium s'accompagne d'une libération de potassium antérieurement rétrogradé et vice-versa. Ces faits confirment que la potasse fixée, actuellement inassimilable, n'augmente que si l'on augmente la potasse totale ; si les apports de potasse compensent les exportations, le taux de potasse assimilable ne change pas. En conclusion, il apparaît que la teneur en K régit le sens de l'équilibre : pour chaque type d'argile il y aurait une teneur critique où l'on assisterait à une prédominance de la fixation sur la libération.

# EQUILIBRES AUXQUELS PARTICIPE LE POTASSIUM DES SOLS

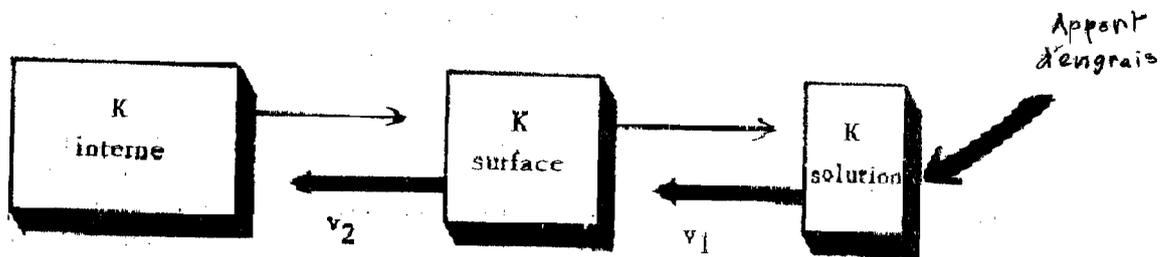
## CAS GENERAL

Le sol renferme un certain pourcentage d'argile; celle-ci est constituée en partie par des minéraux dont la structure permet une circulation interne de cations.



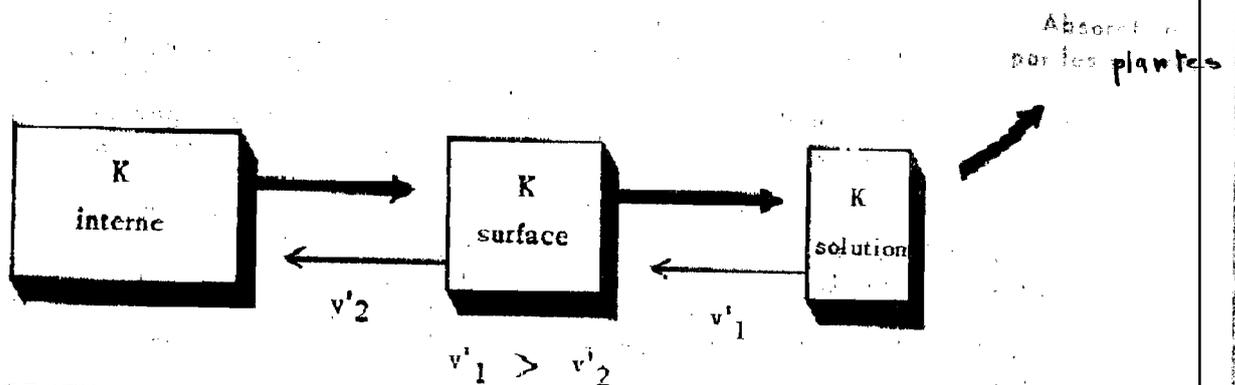
### 1. EQUILIBRE EN SOL NU

--- K échangeable ---  
 ← ← ← K échangeable



### 2: DEPLACEMENT DE L'EQUILIBRE APRES APPORT D'ENGRAIS

$$v_1 > v_2$$



### 3. DEPLACEMENT DE L'EQUILIBRE A LA SUITE DE L'ABSORPTION PAR LES PLANTES

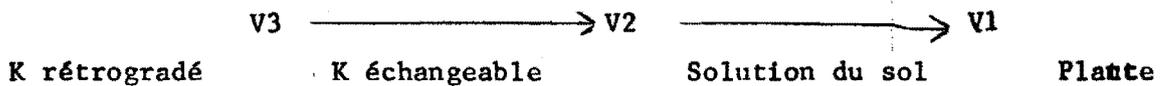
$$v'_1 > v'_2$$

## CHAPITRE III : ABSORPTION DU POTASSIUM PAR LES PLANTES

### I - LOIS de l'ABSORPTION DU POTASSIUM

Une plante, en période active de croissance prélève dans un sol les éléments nutritifs avec une intensité en fonction de leur concentration au voisinage immédiat des racines. Cette diminution locale entraîne une diffusion dans l'ensemble de la phase liquide, de façon à rétablir l'uniformité du potentiel électrochimique de l'élément considéré. Ce processus de diffusion conduit donc à une rupture de l'équilibre entre la phase solide et les sites externes qui sera rétabli par un autre processus de diffusion à l'intérieur de la phase solide. On peut donc déduire que le potassium échangeable est à chaque instant en équilibre avec celui de la solution du sol, et que d'autre part, le potassium rétrogradé peut intervenir en régénérant du potassium échangeable.

Comme nous l'avons vu antérieurement, l'alimentation potassique des végétaux dans le sol se résume donc de la façon suivante :



V3, V2, V1 désignent les vitesses respectives de passage d'un état à l'autre.

En exportant du potassium, la plante appauvrit la solution du sol et provoque une rupture d'équilibre. Celui-ci est rétabli par passage du potassium échangeable vers la solution. Si l'on suppose qu'une alimentation normale de la plante est caractérisée par une vitesse de passage  $V1$  du potassium vers la plante, l'alimentation potassique sera bien assurée, si la vitesse  $V2$  de renouvellement de la solution du sol aux dépens des réserves est égale à  $V1$ . Cependant si le niveau des réserves de potassium échangeable est trop bas et que, de ce fait, la vitesse  $V2$  soit inférieure à  $V1$ , la plante souffre de carence potassique.

La rupture d'équilibre entre K échangeable et K rétrogradé provoque une régénération de K échangeable. Cette régénération a lieu à la vitesse  $V3$ . Dans le cas d'un sol très pauvre en K échangeable et renfermant des argiles illitiques à fort pouvoir de régénération, il peut arriver que la vitesse  $V3$  devienne égale à  $V2$ . Le niveau du potassium échangeable se maintient ainsi approximativement constant malgré les exportations de la plante. Ceci explique les observations de quelques auteurs qui ont constaté que dans certains sols, le niveau de potassium échangeable n'était pas abaissé après plusieurs récoltes, il s'agit là d'un cas extrême.

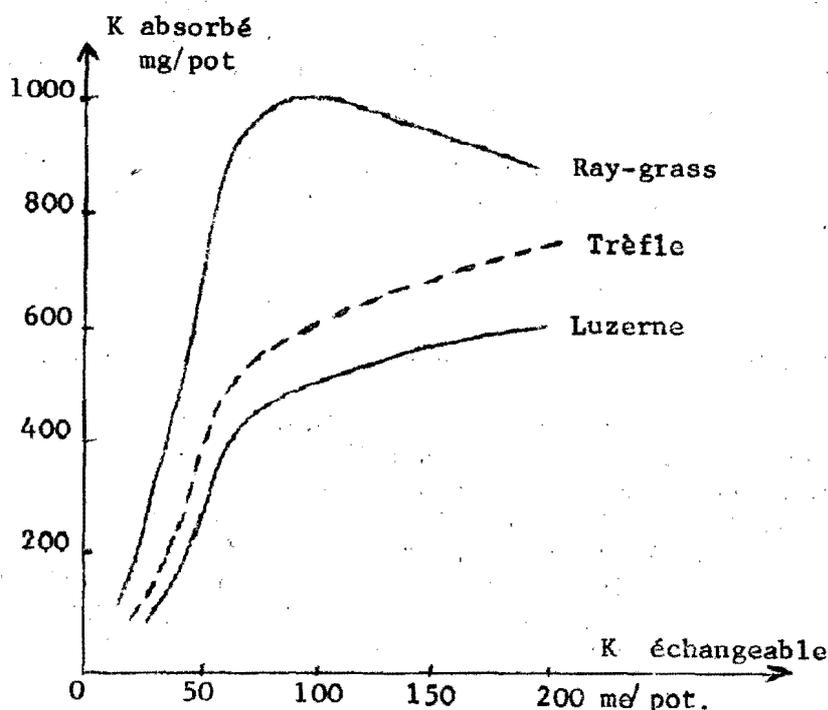
Cette absorption par les plantes dépend de plusieurs facteurs.

A - L'absorption est fonction directe du nombre d'ions  $K^+$  présents dans le milieu et non du rapport  $K/T$  (capacité totale) ; elle augmente bien pour un même milieu quand  $K/T$  croît, mais pour un même  $K/T$ , elle varie suivant la valeur de  $T$  (BLANCHET). En effet, si le degré de saturation (rapport de  $K$

échangeable à la capacité totale d'échange) régle l'absorption du potassium. La mobilité des ions joue également un grand rôle et cette propriété est liée à la surface des particules colloïdales.

B- L'absorption dépend essentiellement du développement du système racinaire donc du degré d'exploration du milieu par celui-ci. Il se produit donc une sorte d'équilibre de partage entre plante et sol, indépendant de la capacité d'échange du milieu et de la concentration des solutions du sol ; l'alimentation potassique étant gouvernée par le nombre d'ions  $K^+$  se trouvant dans le volume exploré par les racines.

On perçoit immédiatement une conséquence agronomique : en sols pauvres des plantes telles que le trèfle ou la luzerne à chevelu racinaire peu développé, seront incapables d'explorer le sol et par là même de permettre une bonne alimentation potassique.



En effet, **BLANCHET** a montré que la plante n'absorberait pas les seuls ions  $K^+$  de la solution du sol, mais qu'il existait une possibilité d'absorption directe des ions fixés sur le complexe par contact entre racines et particules du sol, si bien que la connaissance du potassium échangeable ne renseignerait qu'imparfaitement sur les possibilités d'alimentation de la plante dans un milieu donné.

En définitive chaque culture épuise d'autant plus le potassium échangeable de la terre contractée par les racines, que la portion du sol utilisé est plus petite, que la réserve de K est moins abondante et que la diffusion du potassium est plus lente ; une forte réserve pouvant compenser l'insuffisance initiale du degré de saturation en potassium.

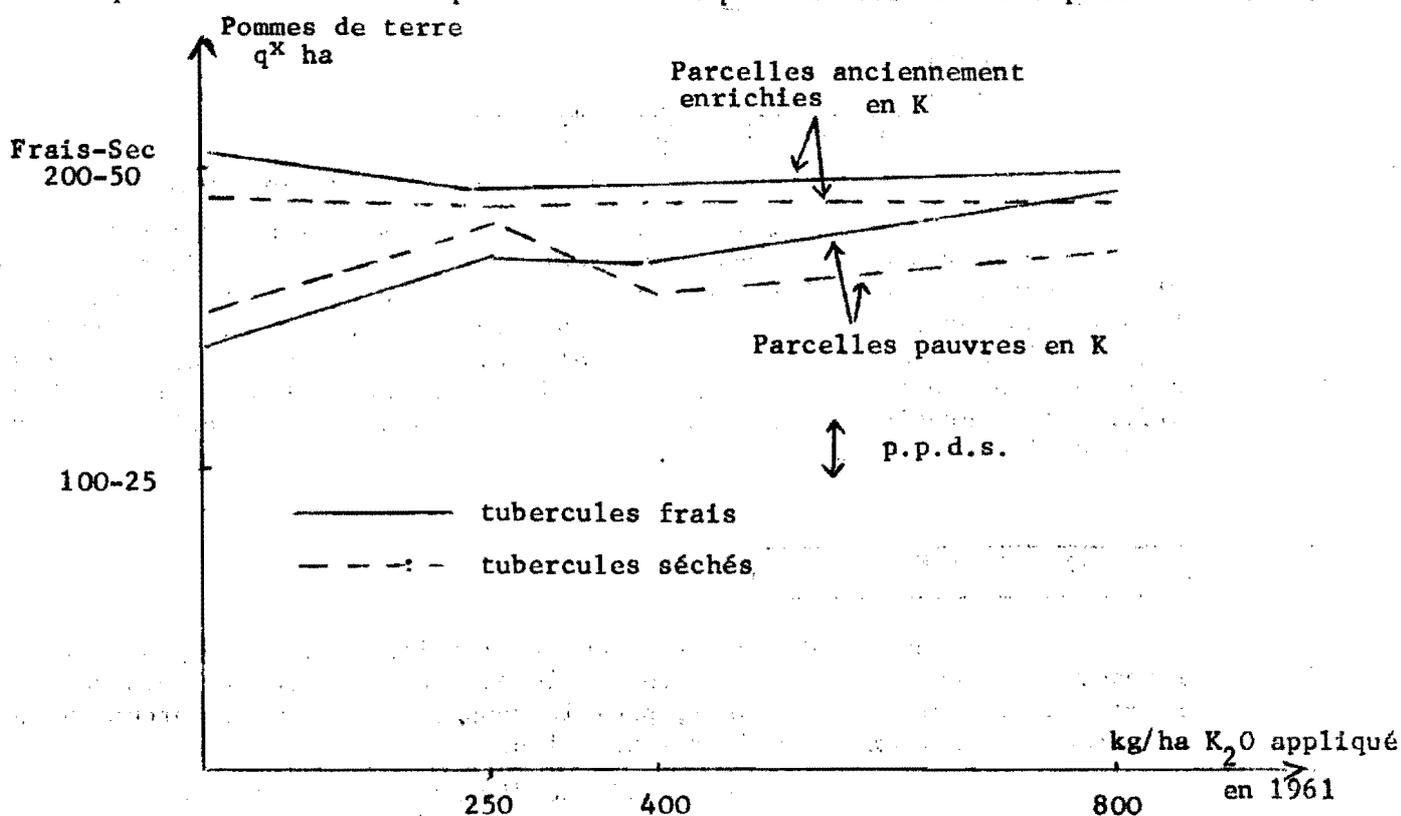
En pratique on peut considérer qu'un sol neutre dont la valeur de T varie de 12 à 15 me, est suffisamment pourvu en K s'il renferme 0,25% de  $K_2O$  échangeable, soit un degré de saturation de 3,5 % ; en sol lourd les chiffres seront plus élevés.

## II - DIFFERENCE d'ACTION ENTRE ENGRAIS POTASSIQUE et RESERVE d'IONS du SOL

Une différence essentielle entre ces deux formes correspond en leur localisation : le K échangeable est uniformément réparti sur toute la surface des colloïdes et en équilibre avec K virtuellement échangeable. Par contre le K de l'engrais minéral est localisé à la surface des mottes en fonction du travail du sol, cependant par l'intermédiaire de l'eau de pluie, les sels peuvent s'infiltrer en profondeur.

En définitive, le potassium d'un engrais récemment appliqué est plus rapidement absorbé par les plantes ( teneur plus élevée ) que celui des réserves, le premier étant localisé sur les parois d'interstices où s'insinuent les radicelles.

A l'inverse le rendement maximum des ions potassiques en réserve dans le sol, peut dépasser le rendement maximum d'un sel de potasse récemment appliqué à doses croissantes à un sol pauvre. Ceci a été démontré par les nombreuses expériences en champ de Van der Pauw sur pommes de terre.

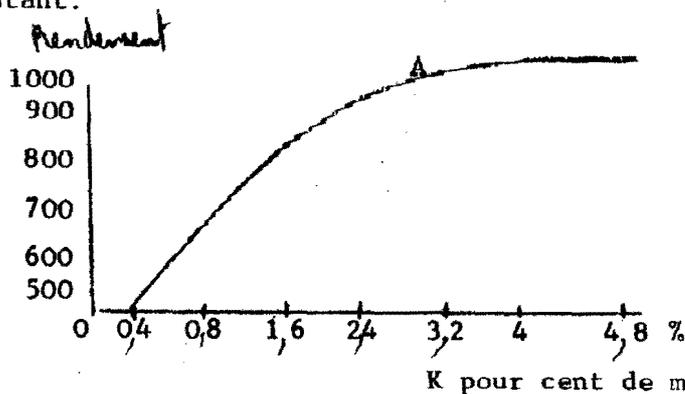


Sur les parcelles anciennement enrichies en K depuis six ans, la récolte a dépassé significativement celle obtenue sur les parcelles testées malgré l'application à ces dernières de fortes doses de sulfate de potasse ; un résultat analogue a été obtenu sur blé de printemps.

En résumé un engrais potassique récemment appliqué a une action alimentaire plus grande que la réserve de potassium du sol à quantité égale de K dans le milieu, mais la réserve du sol, à condition d'avoir été portée, et d'être entretenue à un niveau suffisant, assure des rendements régulièrement plus élevés que ne le permettraient de fortes doses d'engrais potassiques dans un sol resté pauvre.

### III - CONSOMMATION de LUXE

En milieu insuffisamment pourvu de potasse, le développement de la plante reste limité. Lorsque le milieu s'enrichit en potasse, le rendement augmente. Il arrive un moment où des additions supplémentaires de potasse ne provoquent plus d'amélioration du rendement. A partir de ce moment, la plante continue à s'enrichir en potasse, mais en pure perte, puisque le rendement reste constant.

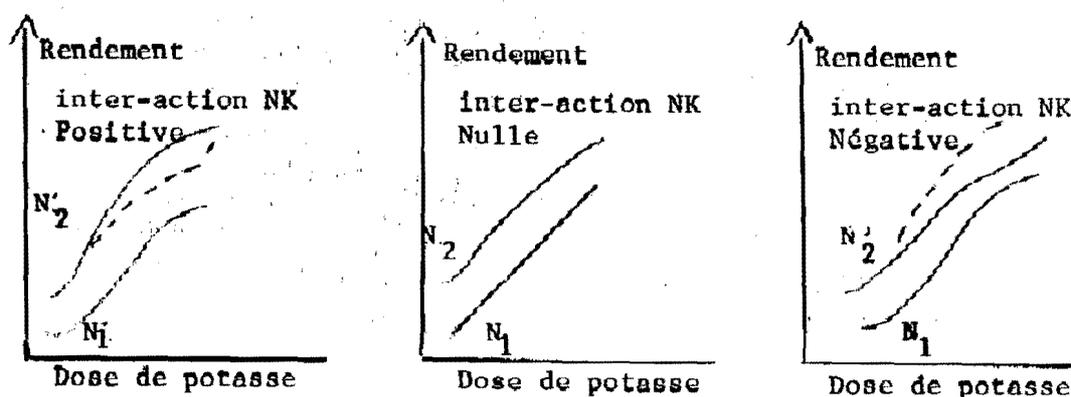


La courbe de la figure ci-dessus résume les résultats obtenus dans des cultures de ray-grass sur solutions nutritives en présence de solutions minérales, de richesse croissante en potasse et de teneur constante en tous les autres éléments indispensables à la plante. On voit qu'à partir du point A, le rendement de la plante plafonne, bien que la teneur en potasse continue à augmenter. En réalité, pour de nombreuses cultures, il est parfois difficile de préciser, avec minutie, le niveau d'absorption qui correspond au début de la consommation de luxe.

### IV - INTERACTION N/K

L'action des divers éléments fertilisants n'est pas additive, l'apport de chacun d'eux exerce une influence sur l'efficacité des autres. Plus le mode de culture est intensif, plus le rapport des éléments prend une grande importance et entraîne des écarts notables.

Cette action simultanée de divers facteurs de croissance ou interaction peut être positive (synergie), ou négative (antagonisme) comme nous l'indiquent les graphiques suivants :



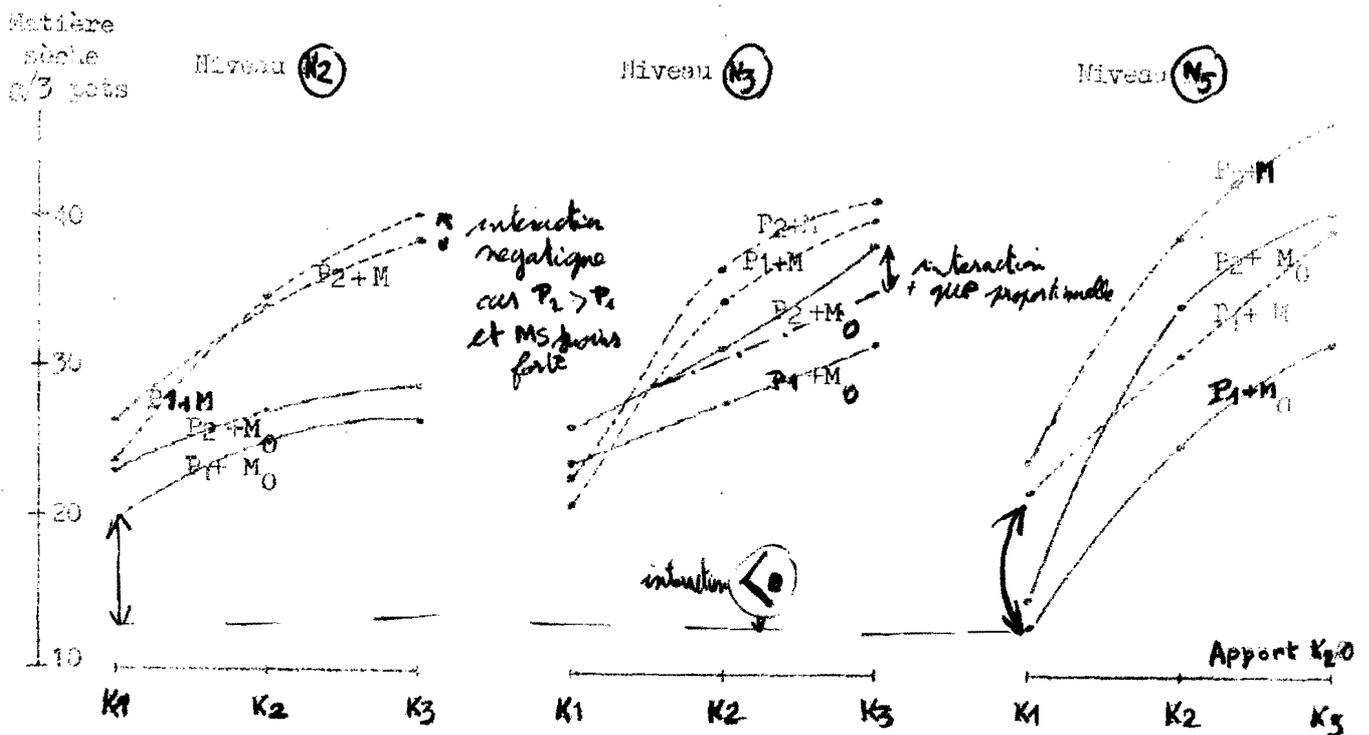
Nous emprunterons quelques exemples à GARAUDEAUX (1962) dans son étude sur la fumure potassique.

### A - Exemple d'interactions en microcultures

Un des avantages des cultures en pots est de permettre des traitements beaucoup plus nombreux que ceux réalisables au champ ; aussi au S.C.P.A. les chercheurs ont utilisé cette technique. Les semis de ray-grass étaient effectués sur 1,180 kg d'un sous-sol d'Aspach et les combinaisons suivantes ont été réalisées :

- 5 doses d'azote ,
- 2 doses de  $P_2O_5$
- 3 doses de  $K_2O$
- 2 doses de matière organique

Les graphiques ci-dessous donnent une représentation partielle de la variation des rendements en matière sèche pour l'ensemble des 4 coupes, en fonction de la fumure potassique apportée.



On voit que lorsque la culture se développe, avec peu d'azote (N<sub>2</sub>) peu de phosphore (P<sub>1</sub>) et sans matière organique (M<sub>0</sub>), l'efficacité de la fumure potassique est nette mais limitée puisque le dédoublement de la dose entre K<sub>1</sub> et K<sub>2</sub> n'augmente que faiblement le rendement.

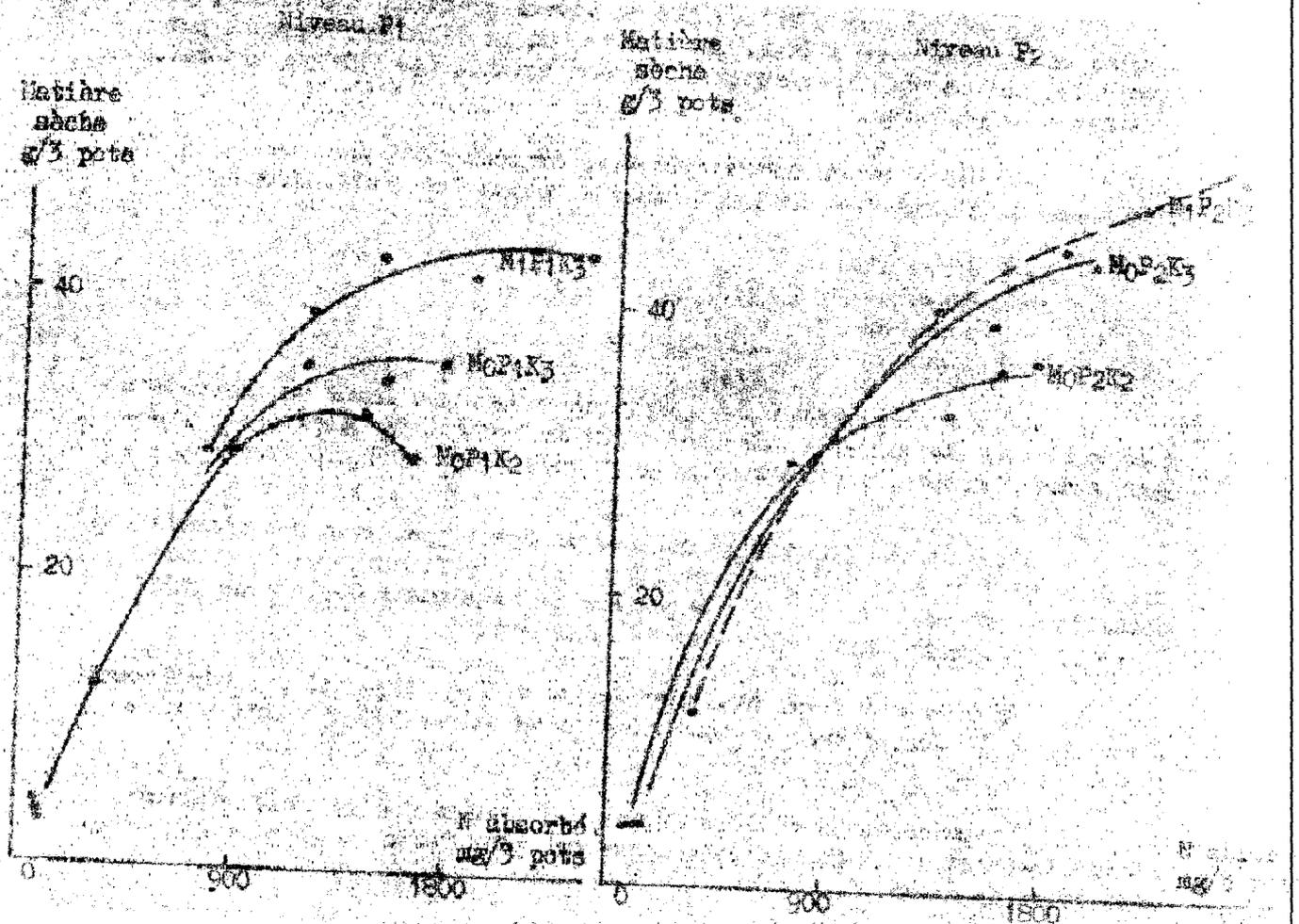
En présence d'une dose plus forte de phosphore (P<sub>2</sub>) il y a simplement décalage de la courbe vers le haut sans qu'on puisse noter d'interaction P x K.

En présence de matière organique, l'augmentation observée avec l'accroissement de la fumure potassique est plus forte et se poursuit nettement entre  $K_2$  et  $K_3$ . Il y a donc interaction entre la matière organique et K (positive) et entre la matière organique et P (négative).

Au niveau moyen de fumure azotée ( $N_3$ ) les résultats sont différents. Sans matière organique, il y a interaction positive entre P et K, qui disparaît après apport de matière organique. Au niveau  $N_3$  l'addition de matière organique est dépressive et ceci pour les deux doses de phosphore. Par contre, elle accroît les rendements lorsque l'alimentation en potasse est suffisante.

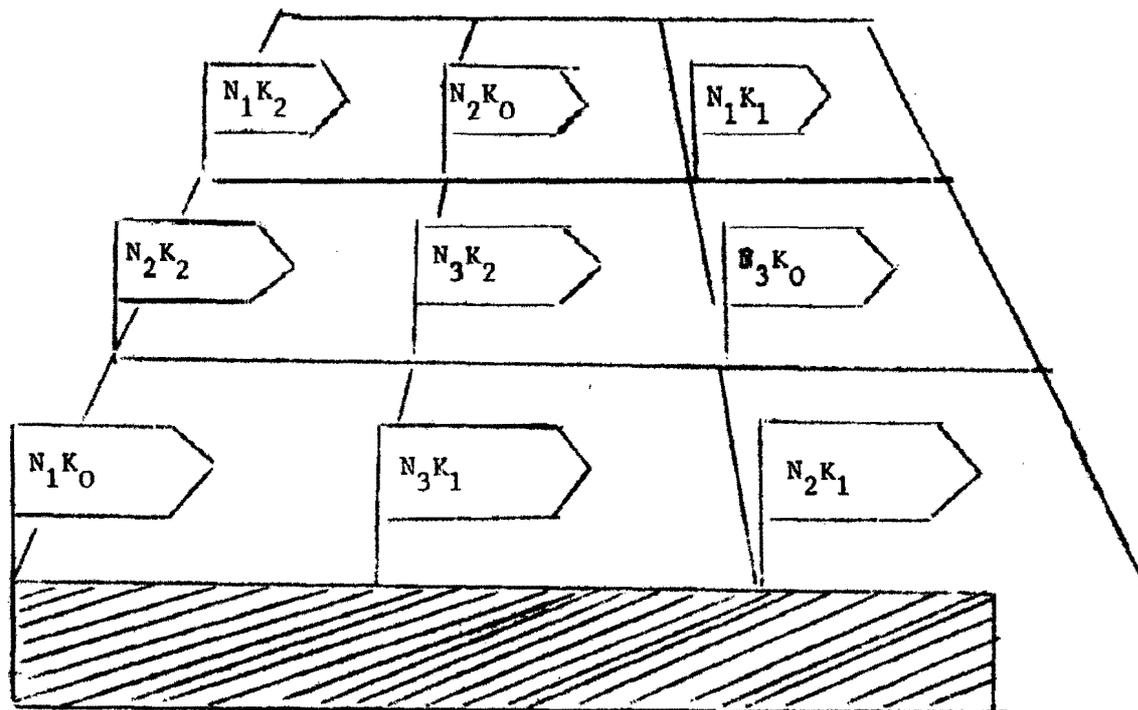
Au haut niveau de fumure azotée ( $N_5$ ), les rendements deviennent plus bas que précédemment et la différence  $P_1$  et  $P_2$  est presque négligable, ce qui veut dire qu'à ce niveau l'alimentation potassique est devenue le facteur limitant. Par contre, pour  $K_2$  et  $K_3$ , la différence entre  $P_1$  et  $P_2$  est très accentuée. La matière organique a accru les rendements sans interaction avec P ou K.

Les graphiques ci-dessous où les rendements ont été portés en fonction de l'azote absorbé, permettent de suivre l'efficacité de l'azote. On y retrouve, bien entendu, une partie des particularités en constatant que la même absorption globale d'azote a conduit à des productions de matière sèche différentes suivant le niveau des autres éléments de la fumure.



B - Essais combinés d'azote et de potasse par expérimentation au champ

A cet effet, il a été étudié à la Station d'Aspach, sur chacun des sols, un dispositif permanent de 6 blocs comportant les 9 traitements résultant de la combinaison factorielle de 3 doses de  $K_2O$  et 3 doses d'azote pour une fumure phosphatée uniforme.



- temoin 0*
- $K_0$  : nulle
- $K_1$  : dose compensant les exportations
- $K_2$  : dose double compensant les exportations et élévation du niveau potassique  
Ceci avec restitution sous forme de fumier, des pailles et fourrages produits.
- $N_1$  : dose inférieure à celle préconisée pour une culture d'intensité moyenne ;
- $N_2$  : dose préconisée pour une culture d'intensité moyenne ;
- $N_3$  : dose présumée représenter la limite supérieure des besoins en culture.

Les écarts entre doses sont toujours égaux.

$$K_2 - K_1 = K_1 - K_0 \quad N_3 - N_2 = N_2 - N_1$$

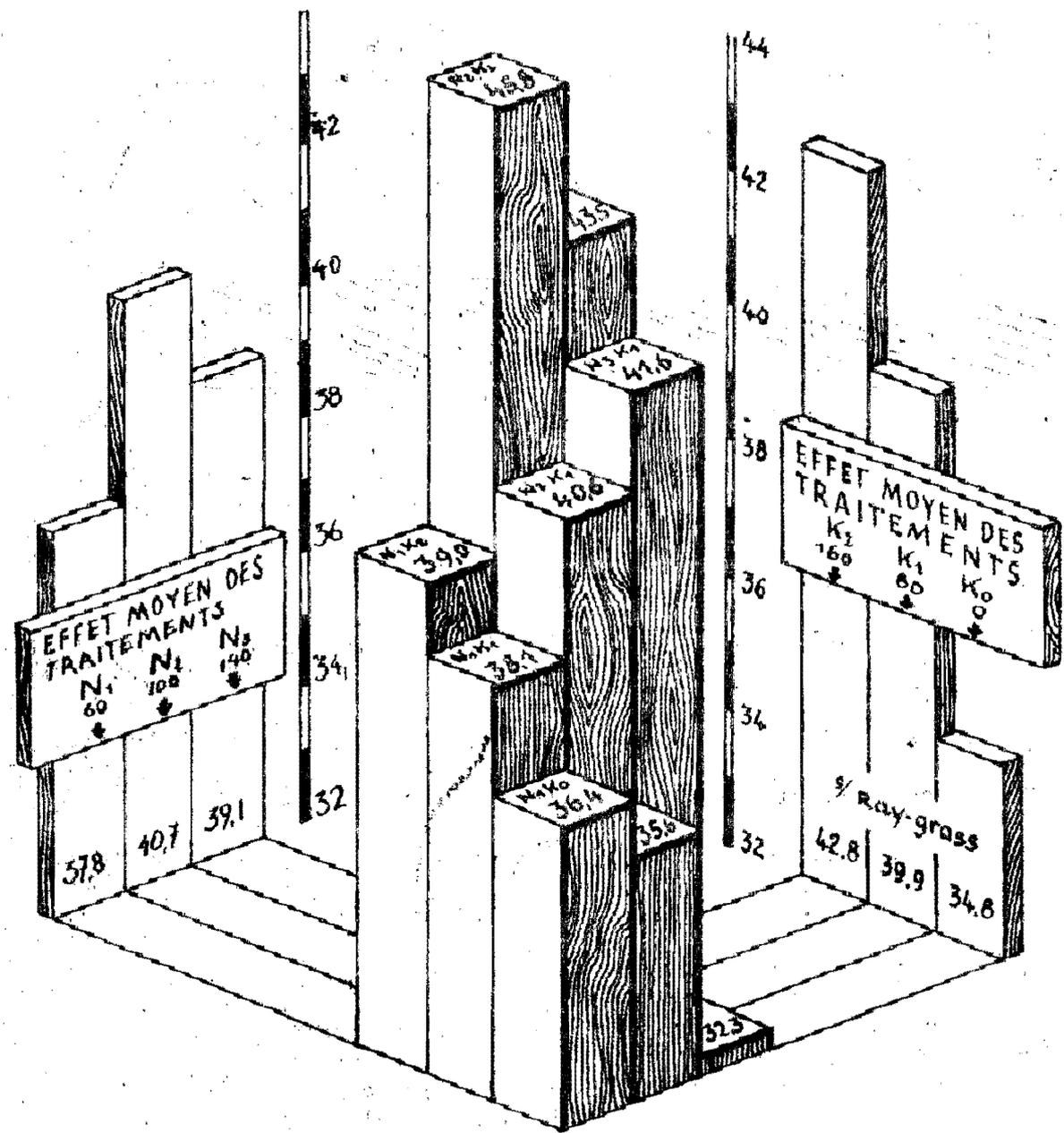
Diverses récoltes ont été régulièrement analysées et l'auteur a dégagé des conclusions à partir des résultats moyens obtenus pour chaque culture, ces dernières étant représentées par des diagrammes. A titre d'exemple, nous présentons celui des essais sur blé. Les résultats traduisent une forte

ESSAIS D'EC. LIBRE AZOTE-POTASSE

Blé Cappelle sur ray-grass, trèfle violet

Rendements en qx/ha de grain

(Moyenne de 2 récoltes)



\*interaction N-K. Notons que des blés sur pommes de terre sont régulièrement plus productifs que des blés sur ray-grass ( rendement moyen 48,9 quintaux contre 39,19. Cependant si la forte fumure azotée a eu un effet très légèrement positif sur les premiers, il est apparemment très dépressif sur les seconds. L'augmentation de la fumure azotée est nettement catastrophique sur les parcelles  $K_0$  ( verse).

Cette expérimentation peut être réalisée sur divers types de culture et donne toujours des résultats très intéressants pour la vulgarisation des fumures azotées et potassiques dans une région donnée, car en l'absence de facteurs limitants intempestifs dus en général à des circonstances climatiques, ou encore à une carence en un élément secondaire ou en un oligoélément, il est possible d'obtenir pour des doses convenables d'azote et de potasse ( la fumure phosphatée étant largement calculée) une interaction positive importante.

Les résultats d'ASPACH montrent que cette interaction ne devient réellement importante que pour les fortes doses d'azote et de potasse, dont la rentabilité se trouve, de ce fait, encore augmentée. Cette interaction se traduit donc par un supplément important de récolte dû uniquement au fait que les deux éléments agissent ensemble, c'est-à-dire sans dépense d'engrais supplémentaire.

Il faut également mentionner que si les doses élevées de potasse donnent généralement des suppléments de rendements permettant de rembourser plusieurs fois le coût de la fumure, ces dernières augmentent le niveau des réserves du sol, donc l'investissement constitué par les fortes fumures paraît totalement autofinancé.

## CHAPITRE IV : DIAGNOSTIC DU MANQUE DE POTASSIUM

Evidemment la meilleure réponse est celle donnée par les plantes, mais l'interprétation délicate et la difficulté de mettre en place des protocoles toujours adéquats enlèvent beaucoup de vigueur aux résultats expérimentaux aux champs. Il est de même difficile de reproduire en vases de végétation les conditions naturelles. Aussi emploie-t-on différentes méthodes d'investigations.

### I - METHODES CHIMIQUES

La détermination du potassium échangeable ou potasse assimilable correspond à la mesure de l'ensemble des ions K<sup>+</sup> actuellement retenus dans les essais d'ions; mais elle ne décrit pas leur mobilité; il serait très intéressant de mesurer la cinétique de cet échange d'ions, voir même l'énergie de fixation: c'est-à-dire l'énergie nécessaire pour échanger un ion.

On a pensé améliorer ce test en calculant les rapports K/TouK/Ca. En effet, nous avons vu d'après la formule de l'échange K/Ca que dans un milieu donné, donc à concentration sensiblement constante de la solution en Ca, la concentration en K de celle-ci est proportionnelle au degré de saturation en K du complexe absorbant. Ce dernier donnerait donc une idée de l'assimilabilité de K.

D'après STRASMAN, QUIDET et BLANCHET (1958) lorsque le rapport  $100 \frac{K}{Ca}$  (K et Ca exprimés en milliéquivalents) est supérieur à 4, le sol est bien pourvu en potasse. Entre 3 et 4, une fumure d'entretien est nécessaire. Au-dessous de 3, les besoins en potasse sont élevés.

Certes ces deux tests donnent des corrélations intéressantes entre K échangeable et récolte, mais on est obligé d'admettre qu'ils s'appliquent surtout dans deux cas particuliers:

- Lorsque chaque volume de sol n'est mis à contribution qu'une seule fois et pendant un temps court et lorsque la vitesse de libération du K fixé est assez grande pour maintenir le potentiel alimentaire à un niveau proche de sa valeur initiale.

Il ne faut pas oublier que le potassium dit échangeable n'est pas intégralement assimilable puisque le végétal n'extrait jamais la totalité de K échangeable. D'autre part, le K non échangeable intervient dans la nutrition potassique. L'intérêt de la détermination du K échangeable ne réside pas dans l'évolution d'un stock plus ou moins important, mais elle indique une possibilité de transformation vers des formes assimilables par les végétaux. Cette dernière raison a permis d'établir les corrélations suivantes entre les réactions des sols aux engrais potassiques et leur teneur en K<sub>2</sub>O échangeable.

	Tubercules racines prairies artificielles		Céréales
	avec fumier	sans fumier	sans fumier
Besoins nuls	0,30	0,40	0,25
Besoins modérés	0,30 à 0,10	0,40 à 0,15	0,25 0,12
Besoins intenses	0,10	0,15	0,12

Résultats exprimés en o/oo.

Cependant il ne faut pas oublier que l'analyse ou le test pour fournir un diagnostic valable doit permettre d'apprécier le potentiel alimentaire du sol, et de déterminer la possibilité de l'élément à l'instant de la mesure ainsi que les réserves en cet élément et leur vitesse de passage vers la solution du sol, c'est-à-dire la capacité du sol de maintenir un potentiel alimentaire. Il reste donc que si les méthodes analytiques sont nombreuses elles demeurent incomplètes et il faut donc adopter une approximation générale, capable de donner une corrélation valable avec les réponses des cultures.

## II - ANALYSE DES VÉGÉTAUX

Elle peut permettre de contrôler l'alimentation potassique et de prévoir ainsi le besoin éventuel en engrais ; cette technique est à la base du diagnostic foliaire et du diagnostic ligneux. Elle est utilisée sur une grande échelle pour la fumure de certaines cultures ( vignes, cultures arbustives )/

## III - SYMPTÔMES DE CARENCE

La carence potassique peut se manifester chez les végétaux par des symptômes pathologiques variant selon la gravité de la carence. Lorsque ces symptômes apparaissent, ils sont l'indice d'une déficience marquée. L'absence de manifestations pathologiques ne signifie pas nécessairement que la plante soit bien alimentée et le rendement de cultures d'apparence parfaitement saines, peut être encore augmenté largement par une fumure potassique appropriée.

D'après R. WALLACE (1951) la carence en potasse se manifeste par un développement général réduit, les feuilles présentent une coloration vert bleuâtre avec des chloroses internervaires ; les extrémités des feuilles brunissent ; des taches brunes apparaissent sur le limbe, particulièrement dans les régions marginales, pouvant amener une nécrose généralisée du bord des feuilles.

QUIDET (1960) indique quelques signes caractéristiques du manque de potassium.

### A - Céréales

La paille des céréales carencées en potasse, bien que plus courte, est beaucoup plus sensible à la verse ( réduction des tissus de soutien).

### B - Maïs

Le manque de potasse se traduit sur le maïs par une décoloration et un dessèchement du bord des feuilles. A maturité, les épis sont moins gros et présentent à leur extrémité une forte proportion de grains avortés ( épis non terminés). En cas de déficience grave, on observe souvent avant maturité une versé partielle des tiges qui cassent au niveau des entre-nœuds

### C - Betteraves

En sol fortement carencé en potasse, la levée est souvent difficile. L'examen des jeunes plantules révèle fréquemment la présence d'un champignon qui provoque le noircissement des racines et entraîne la " fonte " du semis. En fin de végétation, en septembre-octobre, les feuilles des betteraves carencées en potasse présentent un flétrissement caractéristique : le bord du limbe prend une teinte jaune-brun et se dessèche. Le brunissement et les nécroses peuvent s'étendre entre les nervures. Des taches et des stries brunes apparaissent également sur le pétiole des feuilles les plus âgées.

### D - Pommes de terre

Quelques semaines après la levée, les plantes carencées se distinguent des autres par un développement moindre et une couleur vert foncé. Les signes typiques de manque de potasse apparaissent en Juin-Juillet. Les feuilles prennent d'abord un aspect recroquevillé et une teinte bronzée surtout accentuée sur les bords ; puis, elles jaunissent et se nécrosent. La végétation s'arrête prématurément et les fanes se dessèchent souvent un mois plus tôt que celles des plantes normalement alimentées. De ce fait, le rendement est très diminué et on constate une forte proportion de petits tubercules.

### E - Légumineuses

Ces plantes sont très exigeantes en potasse, au point qu'on a pu comparer l'action de la potasse sur les légumineuses à l'effet de l'azote sur les graminées.

Les signes de carence en potasse se traduisent d'abord par des punctuations blanchâtres plus denses à la pulve et à la périphérie des feuilles. A un stade plus avancé de la carence, les feuilletés se nécrosent et les plantes s'atrophient.

### F - Arbres fruitiers

Les pommiers présentent fréquemment les symptômes d'une alimentation insuffisante en potasse ; enroulement des feuilles en gouttière suivi d'une nécrose marginale qui donne aux arbres, en cas de carence grave, un aspect grillé, la floraison est abondante et contraste avec la végétation très réduite. Les fruits restent petits et peu colorés, la maturité se fait mal et la conservation est difficile.

### G - Vignes

La potasse entre dans la composition du vin ( bitartrate de potasse) et les raisons en exportent des quantités importantes. En cas d'alimentation potassique insuffisante, les feuilles de vigne s'incurvent vers la face intérieure, prennent un aspect recroquevillé et peuvent présenter des taches brunes ou lie de vin ( brunissement) dans les carences graves, les feuilles se dessèchent prématurément et ne peuvent pas jouer leur rôle physiologique ; les raisins mûrissent alors très difficilement et la récolte de l'année suivante est compromise. A l'automne toutes les feuilles de vigne jaunissent ou rougissent, suivant les variétés, avant de tomber. Pour une même variété, le changement de teinte est beaucoup plus hâtif ( " rougeot " pour les cépages rouges et " flavescence " pour les cépages blancs) lorsque la potasse fait défaut ; néanmoins LEVY (1965) indique les difficultés de différencier la carence et flavescence.

## CHAPITRE V : ENGRAIS POTASSIQUES

### I - OBTENTION DES PRINCIPAUX ENGRAIS POTASSIQUES

#### A - Sylvinite 40% de $K_2O$

La potasse fut découverte dans la plaine alsacienne, en 1904, lors d'un forage entrepris dans la région de WITTELSHEIM pour rechercher de la houille ou du pétrole. Le gisement se compose de deux couches de sylvinite ( 28 % de  $KCl$  - 56 % de  $NaCl$  - 14 % de schiste et impuretés), distantes d'environ 20 m l'une de l'autre et situées à une profondeur variant de 500 à 1 100 m. Des forages ultérieurs ont permis de délimiter le bassin qui s'étend sur une superficie de 20 000 hectares. On estime que les réserves, à la cadence actuelle d'extraction très voisine de 10 millions de tonnes annuelles de sylvinite, permettront une exploitation du bassin pendant un demi-siècle, mais de toutes façons cet engrais est actuellement peu commercialisé.

#### B - Chlorure de potassium ( $KCl$ ) contenant 63 % de $K_2O$

Celui-ci peut être obtenu par différents procédés :

##### 1) - Raffinage thermique

La première technique de raffinage mise en oeuvre consiste en une séparation, entre  $KCl$  et  $NaCl$ , basée sur les différences de solubilité à froid et à chaud.

A 100° cent parties d'eau dissolvent 34,7 g de  $KCl$   
25,8 g de  $NaCl$

A 10° cent parties d'eau dissolvent 12,5 g de  $KCl$   
29,7 g de  $NaCl$

La sylvinite arrive broyée dans un appareil de dissolution chauffé à 110° par un serpentin de vapeur, elle est brassée dans cet appareil avec une eau-mère provenant d'une opération antérieure, saturée à froid en chlorure de sodium et en chlorure de potassium et préalablement réchauffée. Cette eau mère ne dissout que le chlorure de potassium de la sylvinite et non le chlorure de sodium. La solution chaude est ensuite conduite dans de vastes récipients où règne un vide de plus en plus poussé ; il y a donc concentration de la solution et la vapeur qui en résulte est utilisée pour réchauffer de l'eau mère froide. Sous l'influence du vide des cristaux de chlorure de potassium commencent à se former ; ceux-ci se déposent dans les égoutteuses, grands réservoirs qui peu à peu se remplissent de chlorure. Le liquide qui provient de ces égoutteuses contient encore du chlorure de potassium dont une partie se dépose par un refroidissement plus poussé à l'air libre. Le chlorure peut également être séparé de la solution par essorage. Le chlorure de potassium venant des égoutteuses, ou des essoreuses est additionné d'antimassant, puis séché et stocké. Le liquide restant dans les bacs sert après réchauffage, à une nouvelle opération de dissolution.

## 2)- Flottation

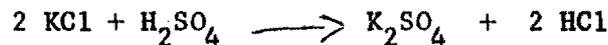
La flottation consiste à broyer le minéral et à le placer dans un bac ou cellule contenant un réactif qui a pour effet de revêtir sélectivement les cristaux de chlorure de potassium d'un film de produit. Des bulles d'air produites par une turbine adhèrent à ce film et le chlorure de potassium est entraîné vers le haut, tandis que, le chlorure de sodium coule au fond.

## 3)- Lévigation

C'est un procédé basé sur la différence de densité, d'ailleurs faible, existant entre les deux chlorures de potassium et de sodium (1,97 et 2,15). Quand le sel est broyé, il est mis en présence d'une eau mère de densité intermédiaire (2,02 en l'occurrence), il y a séparation des deux chlorures, le plus léger surnageant.

### C- Sulfate de potasse ( $K_2SO_4$ ) contenant : 48 % de $K_2O$ et 18 % de S

Le sulfate de potasse est obtenu par attaque à chaud du chlorure de potassium par de l'acide sulfurique suivant la réaction :



Le sulfate de potasse, après refroidissement est stocké. L'acide chlorhydrique, sous produit de cette fabrication, est généralement utilisé pour la production du phosphate bicalcique par attaque, en milieu liquide, de phosphate naturel.

### D- Bicarbonate de potasse (46 % de $KHCO_3$ )

La préparation se produit en trois temps :

- 1)- Précipitation du bicarbonate de potasse par action du  $CO_2$  sur KCl en suspension dans une solution aqueuse d'isopropylamine, ceci dans une série d'autoclaves;
- 2)- Séparation et lavage du bicarbonate de potasse à l'aide d'un filtre rotatif sur lequel le sel est d'abord séparé de son eau mère, puis lavé à contre courant ;
- 3)- Séchage du bicarbonate.

### E- Nitrate de potasse ; $KNO_3$ contenant 44 % de $K_2O$ et 13 % de N

Cet engrais est obtenu par double décomposition à partir de KCl et  $NaNO_3$ .

## II - ECHANGE des IONS K dans les SOLS

Après dissolution d'un sel de potasse dans la solution du sol, les ions  $K^+$  introduits s'échangent contre des cations présents à la surface du complexe argilo-humique, suivant des dynamiques différentes.

A- Echange très rapide lorsqu'il s'effectue contre des ions  $Ca^{++}$  et  $Mg^{++}$  (sols neutres ou alcalins, à complexe saturé ou proche de la saturation). La solution du sol renferme alors un mélange des sels alcalino-terreux, correspondant à l'anion ajouté, avec large prédominance du sel calcique. Il existe de grosses différences dans la solubilité des divers sels alcalino-terreux, donc l'élimination par drainage ; cependant pour certains d'entre eux, des possibilités de fixation à courte distance ou d'absorption

*vendu  
aux industriels  
et non aux  
ruffians.*

rapide, en période de végétation intense, doivent tempérer les conclusions qu'on peut tirer de l'étude de leur dynamique en sol nu.

Dans les études de laboratoire, on peut distinguer, parmi les sels solubles du potassium :

- ceux dont l'anion n'est pas retenu par le pouvoir absorbant du sol.

Chlorure, carbonate, sulfate, nitrate,

- ceux dont l'anion est retenu par le pouvoir absorbant du sol :

Phosphates, silicates

D'un point de vue pratique, il faut mettre à part le nitrate de potasse, dont les deux ions sont rapidement captés par les plantes et, à moindre degré, le sulfate dont une fraction de l'anion parfois non négligeable est fixée par les microbes, dans les sols à bonne activité biologique. D'autre part il ne faut pas négliger l'influence des ions sur la stabilité structurale ( cf. cours agrologie).

Ⓢ) Echange plus lent et moins complet lorsqu'une partie des ions  $K^+$  s'échangent contre les ions  $H^+$ . Ces ions  $H^+$  acidifient la solution du sol et l'on peut alors mesurer une " acidité d'échange ".

En milieu acide, l'ion bicarbonate est décomposé, contrairement à tous les autres, de sorte que l'acidité d'échange est bien réduite ; on peut même admettre qu'on a pratiquement apporté du potassium sans anion, ce qui correspond à une légère élévation du pH.

### III - CONTROLE de GET ECHANGE d'IONS DANS LES SOLS

Une technique simple, permettant un classement rapide des engrais vis-à-vis des sols consiste à agiter une quantité déterminée de sol avec une solution plus ou moins concentrée d'un sel de potasse, puis d'analyser la solution après un temps donné. Un protocole précis a été retenu par l'I.N.R.A. et employé dans diverses stations agronomiques ( BURON, Ann. Agron. Juin 1958)

Dans le sol en place, la solution qui descend par gravité peut s'appauvrir plus complètement au contact des couches successives. C'est pourquoi, dans un deuxième stade, on doit employer une technique de percolation, certes plus longue et plus délicate, mais déjà un peu plus proche des conditions naturelles. Elle consiste à constituer une colonne de terre, à apporter, en surface, une certaine quantité de sel de potasse et à faire infiltrer une quantité connue d'eau distillée. En analysant la solution qui percole, on peut comparer les pertes occasionnées par chaque sel. En fractionnant la colonne de terre et en analysant les diverses fractions obtenues, on peut apprécier la migration des éléments vers la profondeur.

La technique précédente peut être adaptée à des cultures en pots, c'est-à-dire, à un sol cultivé et recevant une fumure complète. Pour cela, on a modifié le mode opératoire habituel, en provoquant, pendant la période de végétation, un drainage strictement contrôlé et de l'ordre de grandeur d'un drainage naturel. Il est certain que, dans la culture intensive, qui correspond automatiquement à de fortes fumures minérales, la nature des engrais et leur date d'apport modifient suffisamment certaines conditions du sol pour introduire des nuances dans la dynamique des éléments minéraux, donc dans leur assimilabilité.

#### IV - ACTION DE DIFFERENTS SELS DE POTASSE SUR LA PLANTE

1) - Equilibre physiologique : La nature du sel de potasse a une influence indirecte sur l'alimentation minérale des plantes. Dans la plupart des sols, l'élimination de l'anion lié au potassium n'est jamais assez rapide, au cours de la période végétative - ou avant son début - pour qu'une partie de cet anion ne puisse être absorbée et jouer un rôle direct dans le métabolisme minéral de la plante.

Or, l'absorption des ions n'est pas indépendante et divers auteurs ont trouvé que, pour un végétal donné, à un stade physiologique bien défini et pour une certaine alimentation azotée, le rapport :

$$\frac{\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Na}}{\text{N} + \text{S} + \text{P} + \text{Cl}}$$

est sensiblement constant dans la plante.

Ceci veut dire, que la concentration en anions restant constante, l'augmentation de la concentration d'un cation aura pour conséquence la diminution des autres cations. Suivant la composition du milieu, suivant aussi la plante considérée, cet antagonisme jouera différemment sur chacun des cations.

Inversement l'augmentation du groupe des anions provoquera une augmentation de l'ensemble des cations qui ne sera pas forcément identique pour chacun d'entre eux. Parmi ces anions,  $\text{NO}_3$  entre dans la plante avec une grande facilité, car il disparaît rapidement pour s'intégrer à la matière vivante. Après lui, c'est Cl qui pénètre le plus aisément dans la plante, en gênant éventuellement l'absorption des autres anions.

Si les conditions du milieu sont telles qu'une partie, non négligeable, de l'azote existe dans le milieu sous forme ammoniacale, il entre en compétition avec les autres cations, mais entraîne aussi un accroissement de la concentration des anions en particulier  $\text{SO}_4$  et  $\text{PO}_4$ .

Il n'est pas douteux que des différences dans l'absorption des éléments minéraux essentiels pour la vie des plantes, puissent avoir des répercussions sur leur métabolisme global. C'est ainsi que l'on a établi depuis longtemps des listes de plantes sensibles à la présence de chlorures, ou de sulfate.

2) - Variation de qualité : Cette perturbation du métabolisme entraîne la possibilité de modification de la qualité des produits.

- Céréales : Amélioration du poids spécifique et accroissement du W
- Betteraves : Amélioration de la teneur en sucre ;
- Pommes de terre : Accroissement du taux de fécule et du pourcentage de tubercules commercialisables ; influence sur la coloration des tubercules après cuisson. (*coloration des pommes schip*)
- Prairies : Accroissement du pourcentage de légumineuses et par conséquent de la teneur du fourrage en protéines, acide phosphorique et chaux ;
- Primeurs : Conservation améliorée, présentation meilleure et très bonne tenue pendant les transports ;
- Raisins et fruits : Accroissement de la teneur en sucre et des qualités organoleptiques, amélioration du degré alcoolique des vins.

- Vins fins : Les ions  $Cl$  se retrouvent dans les moûts
- Tabac : Les ions  $Cl$  diminuent la combustibilité.

#### IV - COMPARAISON DE L'ACTION DE DIVERS SELS DE POTASSE

Il faut bien reconnaître qu'en attendant une modification des prix de vente des produits agricoles amenant les agriculteurs à tenir compte de la notion de qualité, le problème consiste à évaluer les différences de rendement auxquelles peut conduire l'emploi de telle ou telle forme. Des expériences effectuées à Aspach ont permis de constater que, dans une rotation de type normal et dans un milieu relativement tamponné, la nature du sel de potasse incorporé à des mélanges faits à la ferme et pour des fumures moyennes, n'a pas une importance considérable, en sol amendé.

Les résultats précédents ne sont évidemment pas généralisables à n'importe quelles conditions, en particulier à celles de cultures spéciales où on utilise de très fortes fumures (arboriculture, viticulture et horticulture) où l'on devrait pouvoir tenir compte pour le choix des formules, des variations de pression osmotique de la solution du sol consécutive à de forts apports. On sait, qu'à partir d'une certaine valeur de cette pression osmotique, et, semble-t-il, indépendamment des toxicités propres à certains ions, l'alimentation des récoltes en eau devient difficile, sinon impossible.

La nature des engrais n'est sans doute pas indifférente lorsque la fumure est localisée, c'est ainsi que de très nombreuses observations, ont permis de reconnaître la grande sensibilité des résineux aux fumures renfermant des chlorures. En effet la localisation surtout d'engrais composés entraîne dans la première phase d'évolution la formation de petites zones où les sels insolubles baignent dans une solution presque saturée de sels solubles;

Enfin, il ne faut pas négliger pour certaines cultures l'apport de soufre par l'utilisation du sulfate de potassium.

#### V - CONSOMMATION de $K_2O$ EN FRANCE

La consommation totale de potasse aussi bien sous forme d'engrais simple que composés peut être résumée par le tableau et la carte suivants empruntés à la revue "Potasse" (Janvier 1966).

Départements	Consommation		Départements	Consommation	
	total en t K <sub>2</sub> O	en kg K <sub>2</sub> O par ha		total en t K <sub>2</sub> O	en kg K <sub>2</sub> O par ha
Ain	8.243	23,82	Lot	1.961	7,42
Aisne	33.846	63,11	Lot-et-Garonne	8.860	23,87
Allier	6.480	11,06	Lozère	157	0,51
Basses-Alpes	2.702	8,99	Maine-et-Loire	15.988	27,68
Hautes-Alpes	1.293	4,90	Manche	14.130	23,91
Alpes-Maritimes	1.969	12,95	Marne	47.723	87,84
Ardèche	1.870	6,61	Haute-Marne	4.771	14,77
Ardennes	9.139	27,39	Mayenne	17.262	38,11
Ariège	1.117	4,58	Meurthe-et-Moselle	4.477	15,18
Aube	22.851	64,19	Meuse	6.017	16,48
Aude	9.094	22,93	Morbihan	12.305	25,39
Aveyron	1.866	3,05	Moselle	4.500	11,82
Bouches-du-Rhône	11.380	54,76	Nievre	4.414	10,60
Calvados	16.196	35,48	Nord	30.653	69,32
Cantal	660	1,61	Oise	26.322	61,46
Charente	10.579	24,05	Orne	11.046	22,60
Charente-Maritime	12.954	25,47	Pas-de-Calais	29.989	55,89
Cher	12.141	23,97	Puy-de-Dôme	1.613	3,17
Corrèze	750	2,74	Basses-Pyrénées	11.547	36,62
Corse	1.199	2,88	Hautes-Pyrénées	3.440	15,74
Côte-d'Or	12.470	28,13	Pyrénées-Orientales	3.948	23,24
Côtes-du-Nord	19.627	37,54	Bas-Rhin	7.044	27,31
Creuse	3.336	8,48	Haut-Rhin	5.633	29,11
Dordogne	6.168	14,18	Rhône	3.440	19,19
Doubs	3.188	10,13	Haut-Saône	4.020	14,98
Drôme	7.698	25,43	Saône-et-Loire	6.250	10,15
Eure	21.379	51,94	Sarthe	15.401	31,70
Eure-et-Loir	34.734	71,18	Savoie	1.108	5,03
Finistère	19.361	39,41	Haute-Savoie	1.796	8,22
Gard	9.991	34,03	Seine	1.002	(1)
Haute-Garonne	5.154	10,48	Seine-Maritime	25.594	56,91
Gers	10.247	20,40	Seine-et-Marne	31.174	79,95
Gironde	7.115	18,15	Seine-et-Oise	25.003	75,53
Hérault	10.884	31,27	Deux-Sèvres	9.592	18,58
Ile-et-Vilaine	20.382	37,71	Somme	35.229	68,43
Indre	9.845	19,58	Tarn	3.257	8,28
Indre-et-Loire	43.361	31,70	Tarn-et-Garonne	6.329	23,04
Isère	8.859	23,66	Var	3.449	20,31
Jura	2.508	9,32	Vaucluse	10.679	74,89
Landes	11.308	56,51	Vendée	16.507	27,97
Loir-et-Cher	19.821	51,75	Vienne	9.761	18,53
Loire	2.336	7,81	Haute-Vienne	2.640	6,79
Haute-Loire	410	1,52	Vosges	2.741	11,97
Loire-Atlantique	18.118	34,60	Yonne	15.425	40,44
Loiret	21.763	49,00	Territoire de Belfort	300	9,68

(1) Le cas spécial du département de la Seine n'a pas donné lieu au calcul de la consommation par ha de surface susceptible de recevoir des engrais.

## CHAPITRE VI : PRATIQUE DE LA FUMURE POTASSIQUE

### I - BILAN DE LA POTASSE DANS UNE EXPLOITATION

#### (A) - Pertes par drainage

Les mouvements verticaux de K dépendent de la teneur en argile de la nature de ces argiles, du degré de saturation du complexe absorbant. D'après BARBIER et TROCME (1962) les pertes par drainage ont été de 4 kg  $K_2O$  par hectare et an dans les cases lysimétriques de Versailles, à la base d'une couche de 50 cm pauvre en potasse, avec un degré de saturation en potassium de 1,3 % (alors que l'optimum est environ de 4 %). Dans un sol où le degré de saturation en potassium serait de 4 %, elles atteindraient au moins 12 kg par an.

On peut tabler sur une perte de 15 à 20 kg/an par hectare, à la base de la couche labourée. Cette perte augmente avec l'intensité annuelle du drainage (augmentation des bicarbonates lessivés ; augmentation du rapport K/Ca en solution par dilution). Dans les sols sableux, recevant des fumures potassiques optimales, où le degré de saturation en potassium se trouve porté au moins temporairement à un niveau élevé, la perte annuelle de potasse est plus importante.

#### (B) - Exportations

Les exportations dépendent avant tout de la richesse du sol aussi nous nous baserons sur une teneur optimale.

1) - Exportations par les produits vendus : Il suffit de déterminer par analyse la richesse des différentes récoltes.

2) - Exportations suivant le type d'exploitation :

a) Cas d'une exploitation de grandes cultures : Tous les produits sont exportés il suffit de calculer la quantité de  $K_2O$  exportée ; cette quantité peut atteindre 200 kg/ha pour une ferme céréalière avec culture de pommes de terre.

b) Cas d'une ferme d'élevage avec vente de produits transformés (Lait, viande) : Si les pertes de potasse pour les purins et excréments non récupérés sont négligeables, que la répartition de ces mêmes résidus s'effectue uniformément sur toute la surface de l'exploitation, la quantité de potasse exportée ne dépasse jamais quelques dizaines de kg par hectare. Le sol de telles fermes peut devenir ou rester pauvre en potasse, si l'on n'a pas encore employé d'engrais potassique ; ceci à l'exclusion des pièces où l'on concentrerait les fumiers et les purins.

c) En pratique, la plupart des fermes s'échelonnent entre ces deux cas extrêmes.

#### (C) - GAINS

Eventuellement potasse des aliments du bétail ou des engrais potassiques achetés au dehors, ne pas oublier que la libération du potassium par décomposition des minéraux primaires correspond à un gain de potassium actif et jouant le même rôle qu'un apport d'engrais potassique.

## II - NIVEAU OPTIMUM DE K DANS UN SOL

Ce niveau optimal défini par une certaine teneur en  $K_2O$  dépend de plusieurs facteurs dont nous avons étudié l'influence en détail précédemment :

- Valeur de la capacité d'échange liée à la nature des argiles.
- Système de culture envisagé,
- Contrôle de l'évolution de la teneur en  $K_2O$  échangeable par les analyses.

En principe, trois cas peuvent se présenter :

A - Nécessité d'augmenter le niveau du potassium échangeable d'un sol.

Il faudra en général et en fonction du complexe absorbant, appliquer des doses supérieures aux exportations afin d'obtenir un rendement maximum. A noter que dans ces cas la diminution du K échangeable est inférieure au déficit du bilan grâce à la libération du K temporairement fixé ; à l'inverse pour augmenter la teneur d'une certaine quantité il faudra incorporer davantage d'engrais. Le rythme de l'enrichissement sera étroitement lié à l'aptitude des argiles de fixer du potassium à l'état non échangeable.

B - Taux optimum de K échangeable contrôlé par l'expérience en plein champ

Il suffit alors d'effectuer des doses d'entretien en fonction de l'assolement et des exportations et de les majorer d'un coefficient de sécurité avoisinant 20 %. Si le bilan de fumure est en équilibre le taux de K échangeable varie peu en cours de rotation et ce régime d'entretien permettra de négliger les oscillations dues aux équilibres du complexe absorbant. Un contrôle d'analyse s'avèrera utile chaque 5 ou 10 ans.

C - Taux de  $K_2O$  échangeable dépassant nettement l'optimum ( $> 0.35$  o/oo).

L'agriculteur a intérêt à supprimer les apports de sels de potasse pendant un nombre d'années limité, sauf peut-être pour des plantes particulièrement exigeantes ( colza, pomme de terre). Cependant là encore il faut tenir compte, pour obtenir des rendements maxima, de l'effet particulier de la vieille graisse potassique, effet que l'expérimentation des engrais, selon la méthode habituelle, ne peut pas mettre en évidence.

D - En résumé, d'après BLANCHET et al. (1965) : la fertilisation devra donc être adaptée à chaque type de sol car une réserve importante n'est pas nécessaire dans ceux qui cèdent facilement leurs ions  $K^+$ , il est d'ailleurs probable que ces sols s'avèrent difficiles à enrichir en raison de leurs faibles propriétés de rétention. La fumure doit par contre être très bien adaptée aux besoins des cultures.

Les terres riches en argiles illitiques, possèdent des réserves importantes même lorsqu'elles n'ont reçu que des fumures potassiques très faibles ; c'est un signe manifeste de leur rétention assez énergique du potassium. Cette abondance de réserves ne signifie pas toujours que les plantes

soient bien alimentées et si, la fumure peut être plus souple, elle ne doit pas être négligée sauf si l'expérimentation n'a pas prouvé son utilité au cours d'un nombre d'années suffisant.

En conclusion, comme nous l'avons vu, à part des types de sols bien définis, il ne faut pas s'attendre à une réponse aux engrais potassiques aussi spectaculaire que pour les engrais azotés et phosphatés.

D'après la nature du sol il faudra envisager un enrichissement progressif pour un apport de fumure de redressement pouvant atteindre des doses doubles des exportations.

A l'inverse, sauf cas exceptionnels, les fumures d'entretien ne devront pas être négligées, même si les rendements ne fléchissent pas immédiatement, et comme l'a constaté HEBERT (1964) l'enrichissement progressif peut conduire à long terme à des augmentations de rendement dans le cas de certaines cultures.

VIÈME PARTIE

ELEMENTS MINEURS

- CHAPITRE I - MAGNESIUM ET SOL
- II - MAGNESIUM ET PLANTE
- III- DIAGNOSTIC DES BESOINS
- IV - PRINCIPES DE LA FUMURE
- V - SOUFRE ET PLANTE
- VI - SOUFRE ET SOL
- VII- DIAGNOSTIC DES BESOINS EN SOUFRE

## VI° PARTIE : ELEMENTS MINEURS

### CHAPITRE I : MAGNESIUM & SOL

#### I - ETAT NATUREL

La teneur en magnésium totale (MgO) des sols français se situe entre 1 et 20 o/oo de terre sèche. Les teneurs les plus élevées correspondent à des terres dérivant de roches d'origine éruptive, ou de formations sédimentaires calcaires. Dans les terres de limon, les teneurs moyennes sont de 3 à 6 o/oo. Les teneurs en MgO dépassent donc parfois les teneurs en CaO, plus rarement en K<sub>2</sub>O.

Le magnésium des sols s'y trouve principalement sous forme de combinaisons silicatées, ou sous forme de carbonate associé au carbonate de calcium (dolomie).

#### II - EVOLUTION DU MAGNESIUM DANS LES SOLS

##### A - Mg échangeable

Comme le calcium, le magnésium du sol se dissout en forte proportion (de l'ordre de 75 %) dans les acides concentrés. Les réserves du sol en Mg apparaissent donc comme se trouvant sous des formes moins résistantes que les réserves en K, élément peu soluble dans les acides. Cependant une petite fraction seulement de Mg total, 2 à 10 % environ, est échangeable. Parmi les cations échangeables du sol, Mg est en général beaucoup moins abondant que Ca, mais souvent plus abondant que K, bien que Mg total soit généralement inférieur à K total.

Mg échangeable est susceptible de passer partiellement sous forme non échangeable, comme K, mais dans une plus faible mesure. La libération de Mg à partir de Mg non échangeable est plus lente que celle de K à partir de K non échangeable. Il semble donc que le dosage de Mg échangeable puisse fournir une bonne indication sur la capacité actuelle du sol à alimenter les plantes en cet élément. Cependant, l'alimentation des plantes en Mg ne dépend pas seulement de la teneur du sol en Mg échangeable, mais aussi, comme on vient de le voir, de l'action antagoniste d'autres cations. Par ailleurs, en terre calcaire, le dosage de Mg échangeable peut être faussé par la dissolution du carbonate de Mg toujours présent dans le calcaire.

##### B - Migration

La rétention du magnésium échangeable par le complexe absorbant du sol n'est pas très énergique, en sorte que le magnésium, comme le calcium, peut être entraîné en profondeur. Les matières humiques facilitent cet entraînement. Le magnésium entraîné est partiellement retenu dans l'horizon d'accumulation, comme la plupart des éléments. Les pertes moyennes de MgO par entraînement dans les eaux de drainage sont difficiles à chiffrer en culture. Dans les cases lysimétriques cultivées de Versailles, elles varient, suivant les années et les cultures, de 20 à 40 kg MgO par ha et par an, c'est-à-dire par an 2,8 à 6 % du Mg échangeable de la couche labourée. Les pertes de MgO sont plus fortes que celles de CaO par rapport à la quantité existante (pour CaO : 1,2 à 4,3 % environ). L'importance de ces pertes par lessivage

varie bien entendu avec les conditions naturelles ( importance des précipitations, nature du terrain) et les méthodes culturales ( emploi de produits acidifiants notamment).

## CHAPITRE II : MAGNESIUM et PLANTE

### I - ROLES PHYSIOLOGIQUES DU MAGNESIUM

Le magnésium ( Mg) est un constituant de la chlorophylle, dans la proportion de 2,7 %.

- Il intervient dans l'absorption et le transfert du phosphore vers les graines ;
- Il entre dans la constitution de la phytine ;
- Il intervient dans la formation des lipides, sans doute en tant que véhicule du phosphore;
- Il favorise la formation de la xanthophylle et du carotène ;
- Il contribue au maintien de la turgescence cellulaire optimale.

### II - EXPORTATION

Teueur moyenne des plantes en magnésie d'après TROCMEs

P l a n t e s		MgO dans 100 g. de matière sèche ( en grammes )	
Céréales	{graines .....	0,13	- 0,25
	{pailles .....	0,10	- 0,20
Colza	{graines .....	0,30	- 0,40
	{pailles .....	0,15	- 0,20
	{siliques .....	0,25	- 0,40
Betteraves sucrières	{racines .....	0,25	
	{feuilles .....	0,30	- 1,00
P.de terre	{tubercules .....	0,10	- 0,25
	{fanés .....	0,50	- 1,00
Plantes de prairie	{légumineuses .....	0,70	- 1,00
	{graminées .....	0,20	- 0,50
Légumes	{épinards .....	0,80	- 1,50
	{laitues .....	0,20	- 0,50
	{choux .....		0,40
	{poireaux .....		0,50
Feuilles de pommiers ou poiriers .....		0,50	- 1,00
Fruits frais, pour cent de matière fraîche :		0,01	- 0,02

### III - ABSORPTION PAR LES PLANTES

Le magnésium est un élément relativement mobile à l'intérieur des plantes et susceptible de se transporter rapidement, en cas d'insuffisance de l'alimentation, des organes âgés aux organes jeunes ; c'est pourquoi les symptômes de carence en magnésium affectent en premier lieu les parties les plus âgées des végétaux.

L'action antagoniste du potassium vis-à-vis du magnésium a été souvent observée, aussi bien dans des essais en milieu synthétique dans les conditions habituelles de culture : l'enrichissement en potassium du milieu diminue l'absorption du magnésium par les plantes. C'est ce phénomène qui est dans certains cas à l'origine d'insuffisance de nutrition magnésienne des cultures. L'antagonisme du calcium vis-à-vis du magnésium est moins marqué et moins régulier que l'antagonisme potassium-magnésium. Quant à l'antagonisme hydrogène/magnésium, supposé par certains auteurs, il est considéré par d'autres comme relevant uniquement d'un mauvais développement des racines en milieu acide. Les ions ammonium sont également considérés comme pouvant entraver l'absorption du magnésium, par leur action propre et par l'acidification qu'ils produisent. Inversement, le magnésium en excès peut avoir une action antagoniste vis-à-vis d'autres éléments ( potassium)..

Il faut remarquer que la tétanie d'herbe ( hypomagnésie des animaux) résulte également d'un déséquilibre entre la teneur en Mg et K des tissus végétaux ( KEMP - VOISIN, 1964).

## CHAPITRE III : DIAGNOSTIC DES BESOINS

### I - SYMPTÔMES DE CARENCE

Bien que le magnésium soit en quantité relativement élevée dans les graines, c'est sur l'appareil végétatif qu'apparaissent surtout les symptômes de carence ; ces symptômes, variables avec les espèces - et parfois avec les variétés - présentent les caractères généraux suivants, plus ou moins accentués, suivant l'intensité de la carence.

Le magnésium étant un constituant de la chlorophylle, la carence de cet élément provoque des chloroses de certaines parties du limbe pouvant se transformer progressivement en nécroses. Chez certaines plantes, comme la vigne, le maïs, on peut observer, au lieu de chloroses, des colorations rougeâtres par formation d'anthocyanes. Comme pour beaucoup d'autres carences, les symptômes se répartissent à peu près symétriquement par rapport à la nervure médiane.

Les symptômes apparaissent en premier lieu sur les feuilles les plus âgées, et gagnent peu à peu les plus jeunes. Les feuilles atteintes se détachent prématurément, en particulier chez les arbres fruitiers.

Comme plantes sensibles il est possible de signaler : la pomme de terre ( au moins certaines variétés ) la tomate, la betterave sucrière, la vigne, le framboisier, le rosier.

## II - ANALYSE DES SOLS.

SCHACHTSCHABEL adopte les limites suivantes, valables pour des plantes annuelles :

- Sols sableux ..... 0,08 o/oo MgO échangeable  
(extractible par une solution aqueuse de chlorure de calcium)
- Sols de limon ..... 0,11
- Sols argileux ..... 0,19

Les sols pauvres sont surtout des sols légers acides, fortement lessivés ( podzoliques). Toutefois, des insuffisances de magnésium ont été observées dans tous les types de sols et à tous les pH. En fait il faut aussi tenir compte, en dehors des facteurs naturels, des conditions de culture ( par exemple, emploi intensif d'engrais potassiques, créant un déséquilibre par insuffisance de Mg ou de produits acidifiants).

## CHAPITRE IV : PRINCIPES DE LA FUMURE

### I - EXPORTATIONS

On évalue les exportations de magnésium ( MgO) par les récoltes à 20-35 Kg/ha, compte tenu des restitutions par les pailles et les déchets. En outre, le lessivage correspondrait à des pertes de l'ordre de 15-30 kg par an ( la rétention de MgO dans le sol n'est pas très énergique), si bien que le sol s'appauvrirait en moyenne de 40-60 Kg de magnésium par an.

### II - APPORTS

Les apports de magnésium dans le sol peuvent avoir plusieurs origines :

- précipitations atmosphériques en fonction des régions ( plus accusées aux bords des océans),

- fumiers : en moyenne 2 kg de MgO par tonne, mais richesse assez variable.

- amendements magnésiens : dosant de 20 à 35 % de MgO, suivant qu'il s'agit de dolomies ou de chaux magnésiennes. Leur emploi à la dose de 1 à 3 t. apporte 350 à 600 Kg de MgO/ha, sous forme de carbonates.

- engrais : contenant de la magnésium. On peut citer le nitrate de chaux et de magnésium ( 8% MgO), le Patent Kali (8% MgO), les scories Thomas (2 à 5%MgO), Super (0,5); (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> Ca (0,2).

- sulfate de magnésium : ( 16 % MgO). Dans les sols à pH élevé, ce produit pourra remplacer les amendements magnésiens, à la dose de 4 à 700 Kg/ha. On l'emploie également en pulvérisations répétées sur arbres fruitiers (2%).

## CHAPITRE V : SOUFRE ET PLANTE

### I - ROLES du SOUFRE

1°) En tant que constituant indispensable de la cellule des végétaux supérieurs, le soufre joue un rôle "plastique" ou constructeur qui intervient dans le métabolisme de l'azote. En son absence l'azote soluble s'accumule ; la synthèse des matières protéiques n'a pas lieu ; le soufre devient le facteur limitant du développement et la plante ne peut plus former ses tissus quelles que soient les quantités des autres éléments dont elle dispose.

COIC insiste sur l'équilibre qui, entre S et N, doit être respecté à tout moment du cycle végétatif ; cet équilibre a beaucoup d'importance pour les plantes de prairies et, notamment pour les graminées de prairies. Toutefois, il faut remarquer que la possibilité du stockage du soufre à l'état d'ion  $SO_4$  doit être beaucoup plus grande que celle qui concerne  $NO_3$ .

2°) D'après HOFMANN, les sulfates soutiennent l'action de la potasse sur les phénomènes d'assimilation. En cas d'excès de potasse, les sulfates agissent même comme régulateurs et rétablissent l'équilibre métabolique. Ses travaux prouvent aussi les effets d'interaction des ions  $SO_4$  et Cl sur l'activité enzymatique et sur divers aspects du métabolisme des plantes.

3°) La carence en soufre affecte essentiellement la photosynthèse qui ne peut s'effectuer normalement ; la chlorose qui la traduit se manifeste surtout au cours des premiers stades de la végétation ; les feuilles jaunissent les plantes restent chétives. Comme la majeure partie du soufre protéique de la feuille se trouve dans les chloroplastes, on conçoit que la photosynthèse soit réduite.

4°) Il ne faut pas oublier que par l'intermédiaire des végétaux, le soufre joue un grand rôle dans la physiologie animale et humaine.

### II - ABSORPTION par les VEGETAUX

Si l'alimentation des plantes en soufre s'effectue essentiellement à partir des sulfates, des expériences ont prouvé que les plantes et les tissus végétaux possèdent le pouvoir d'assimiler le soufre organique. Dès 1937, BARBIER démontre que l'excès de soufre ne provoque aucune modification dans la nutrition minérale des plantes (pas de consommation de luxe) et n'entraîne aucun effet toxique direct. A noter que des expériences au  $^{35}S$  indiquent une fixation élective du soufre dans les organes jeunes ou en voie de croissance.

D'autre part, s'il existe une synergie d'absorption très nette entre S et N, on constate un antagonisme avec le chlore et le sélénium. Le S est présent dans les plantes sous plusieurs formes avec prédominance de l'une ou l'autre en fonction du stade végétatif et des organes.)

- migrations et mise en réserves : S minéral.  $SO_4$

- transformation en S organique par réduction presque complète dans les grains mûrs, mais incomplète pour les autres organes. Les formes organiques les plus fréquentes sont les acides thioaminés (cystine méthionine) et les hétérosides soufrés.

### III - EXPORTATIONS

Si la composition élémentaire des tissus végétaux ne permet pas de classer le soufre, le calcium et la magnésie dans les éléments majeurs, il ne faut pas les assimiler aux oligo-éléments. En effet, très souvent le rapport S/P est élevé:

luzerne	: 1,06	Avoine	: 0,61
trèfle	: 1,17	Mais	: 0,47
colza	: 1,56	Blé	: 0,44
Orge	: 0,80		

Les exportations moyennes peuvent se résumer dans le tableau suivant, publié en 1963, par la société des superphosphates.

Nature de la culture	Rendement	Exportations
Blé .....	40 qx	Grain ..... 5,4 à 8 kg/ha Paille ..... 5 à 9 "
Orge .....	30 qx	Grain ..... 4,2 à 7 " Paille ..... 6 à 10 "
Mais .....	50 qx	Grain ..... 8,5 à 12 "
Colza .....	30 qx	Grain ..... 25,2 à 36,6 "
Pommes de terre .....	30 tonnes	..... 9,5 à 13 "
Betteraves sucrières décolletées .....	48 tonnes	..... 16 à 18 "
Luzerne .....	70 qx	..... 15 à 30 "
Trèfle violet .....	70 qx	..... 8 à 18 "

En résumé on peut classer :

- Les plantes dont les besoins sont élevés, pouvant aller jusqu'à 80 kg à l'ha, parce qu'elles contiennent des composés soufrés, ex : colza, chou, moutarde, ail, oignon, etc....

- Les plantes dont les besoins sont importants, de l'ordre de 40 kg/ha, car elles forment une grande quantité de protéines, ex : légumineuses, plantes fourragères.

- Les plantes qui n'entrent pas dans les catégories précédentes et dont les besoins totaux sont moins importants ( 25 kg/ha) mais qui ont, néanmoins, des exigences de pointe à certains stades critiques, ex : céréales.

Toutefois, comme pour les autres éléments, il ne faut pas négliger la période critique au moment de la croissance active surtout au moment des périodes de lessivage intense. Dès 1960, COIC et LEFEBVRE indiquaient les risques de déficience en soufre pour l'alimentation normale des blés d'hiver avec symptômes nets de carence à la montaison.

## CHAPITRE VI : SOUFRE ET SOL.

### I - ETATS NATURELS

Le soufre est présent en très faibles quantités dans les sols. Globalement, la teneur en soufre de la croûte terrestre est de 0,12 %, équivalente à celle du phosphore, au 1/20 du potassium et du sodium, au 1/30 du calcium.

S = 0,12 % - P = 0,12 %      Mg = 2,24 %  
K = 2,46 % - Na = 2,46 %      Ca = 3,47 %

Sa répartition à l'état minéral se complète par une présence dans les eaux naturelles, ce qui justifie la classification suivante :

a) Soufre natif : Rassemblé en gisements à plus ou moins haute teneur, le soufre natif se trouve dans les régions volcaniques actuelles ou anciennes. Il se présente sous forme de minerai.

b) Roches sulfatées : Comme pour le phosphore, les roches primitives anciennes (granit, gneiss, schistes) ne contiennent que de faibles quantités de soufre tandis que les roches volcaniques (basalte) sont mieux pourvues. Les roches sulfatées apparaissent essentiellement dans les dépôts sédimentaires; la plus répandue est le sulfate de calcium hydraté (gypse  $SO_4 Ca, 2 H_2O$ ) issu de l'altération de l'anhydrite (sulfate de calcium anhydre) par absorption d'eau avec augmentation de volume.

c) Sulfures métalliques : Les sulfures métalliques naturels constituent des gisements de pyrites (sulfure de fer), de blendes (sulfure de zinc), de chalcosine (sulfure de cuivre), de galène (sulfure de plomb). Les pyrites sont avant tout considérées comme une source de soufre, tandis que dans la blende et dans la chalcosine traitées par la métallurgie, le soufre ne représente qu'un sous-produit.

d) Hydrogène sulfuré : Certains pétroles et gaz naturels contiennent de notables quantités de soufre, généralement sous forme de  $SH_2$ , provenant, semble-t-il, de la réduction du gypse par les carbures d'hydrogène. On l'extrait par des traitements chimiques de raffinage, soit sous forme élémentaire, soit sous forme d'acide sulfurique : c'est du soufre de récupération et d'épuration. Des disponibilités considérables en cet élément sont ainsi apparues dans notre pays : 1,4 million de tonnes par an, à partir de 1962 (Lacq)

e) Les eaux naturelles : Ceci tient à ce que le soufre est surtout présent dans les sols sous forme de combinaisons organiques dont l'évolution libre des produits, tant oxydés que réduits, qui sont le plus souvent solubles, à l'exception du sulfure de fer.

*f) libération du S organique à partir  
des réserves du sol.*

## II - EVOLUTION dans les SOLS

La teneur en S total des sols agricoles se situe généralement entre 0,2 et 0,5 ‰, soit 600 à 1500 Kg/ha.

a) Minéralisation : La majeure partie du soufre total des sols (75 à 90 %) se trouve sous forme de combinaisons organiques ; il n'a pas encore été démontré que des acides aminés tels la cystine et la méthionine participent en quantité importante à la constitution des composés humiques. Cependant la teneur en soufre de la matière organique du sol est relativement peu variable, dans un milieu sol-climat de type donné, de même que le rapport soufre-carbone (analogie avec le rapport azote-carbone). En milieu aéré, ce soufre organique se minéralise progressivement à l'état de sulfate. Mais inversement, du soufre minéral peut passer à l'état organique par apport de matière organique pauvre en soufre. Dans un sol maintenu en équilibre humique la minéralisation du soufre pendant certaines phases de la rotation est compensée par l'organisation du soufre à d'autres moments. Pour entretenir la fertilité, la totalité du soufre exporté par les récoltes et par drainage doit être compensée par des apports correspondants.

En effet, ce sont les ions  $SO_4$  qui constituent la forme assimilable par les végétaux. Selon VINCENT (1935) la matière organique des sols acides est moins riche en N et S que celle des sols neutres ou alcalins. Sans insister sur le côté microbiologique de cette minéralisation, notons que dans certaines conditions d'anaérobioses des processus de réduction interviennent avec transformation des sulfates en sulfure ; ceci se traduit par une odeur caractéristique ( $H_2S$ ) se dégageant de matière organique située à des niveaux réducteurs (vieille prairie à gley - stagno-gley). Il peut également se former du sulfure de fer noir insoluble dont la présence est l'indice d'un milieu très toxique pour les racines.

En pratique, il nous faut retenir que les conditions de minéralisation optimum (humidité, température) n'étant pas favorables au début du cycle de végétation, les disponibilités en S risquent d'être insuffisantes pour les plantes se développant rapidement au printemps (colza - trèfle - luzerne).

b) Migration : Il faut mentionner que l'anion  $SO_4$  ne peut être retenu directement par le complexe argilo-humique de charges négatives. Le rôle intermédiaire du calcium permet une fixation variable qui atteindrait 50 kg à l'hectare en fonction du degré de saturation du sol. KEILLING (1960) pense que les ions sulfates sont retenus par les hydroxydes de fer sous forme d'essaims d'ions "

Les sulfates se comporteront donc dans les sols d'une façon générale, comme les nitrates, avec possibilité de migration par lessivage ou par remontée capillaire. Notons que généralement, l'anion  $SO_4$  entraîne une décalcification par entraînement de  $CaSO_4$  dans les cas de pluie ; l'intensité de l'acidification qui en résultera, dépend de la nature du cation (maximum avec les ions ammonium), et l'inverse, l'absorption du soufre à partir de  $CaSO_4$  par les végétaux libère du Ca susceptible de se fixer au complexe absorbant.

L'analyse des eaux de drainage fait apparaître une perte annuelle moyenne de 30 à 80 kg par hectare et par an ; il s'agit de la plus forte perte observée avec celle de N, après celle du calcium. Cependant, ces pertes ne sont pas distribuées régulièrement au cours de l'année, la répartition sous la dépendance du régime des pluies accuse un maximum en automne se traduisant après un hiver pluvieux par un fort déficit au printemps.

## CHAPITRE VII : DIAGNOSTIC DES BESOINS EN SOUFRE

### I - SYMPTONES DE CARENCE

Les symptômes visuels de carence s'apparentent étroitement à ceux de la carence en N avec lesquels ils peuvent être facilement confondus. On constate un vieillissement prématuré ; les feuilles deviennent vert pâle. Le jaunissement paraît moins net que pour la carence en N, mais les feuilles les plus âgées prennent une couleur " tabac " puis meurent.

### II - ANALYSE FOLIAIRE

Après attaque de l'échantillon sec par l'acide nitrique et calcination, on élimine l'excès de  $\text{NO}_3\text{H}$  avant de précipiter les ions  $\text{SO}_4$  sous forme de  $\text{SO}_4\text{Ba}$ .

### III - ANALYSE DANS LE SOL

- Dosage total par formation de sulfates alcalins transformés en  $\text{SO}_4\text{Ba}$
- Dosage gravimétrique, BERTRAND ( 1927)
- Dosage colorimétrique ( acidéchloranilique)
- CHESNIN et YEN (1951) proposent une méthode de dosage par turbidimétrie du soufre assimilable après extraction par des réactifs doux ( réactif de MORGAN -  $\text{ClH } 0,001 \text{ N-}$ ).

Il est encore prématuré de définir par ces méthodes des critères relatifs au niveau d'alimentation en S des plantes.

## PRINCIPES DE LA FUMURE

### I - APPORTS

Soit sous forme de composés présents dans les engrais ou de soufre élémentaire, l'industrie des engrais minéraux s'orientant vers la fabrication d'engrais concentrés exempts de sulfate, peut tenir pour certain qu'il en résultera une déficience en soufre des cultures, à plus ou moins long terme

Il faudra donc apporter ce métalloïde sous une autre forme, Aussi les études de SIMON-SYLVESTRE et BOISCHOT (1962) effectuées en laboratoire avaient pour but de déterminer l'influence d'un apport de soufre métallique sur le pH des sols et sur la microflore.

a) - Influence sur le pH : en sols calcaires ( nus ou cultivés) les apports de soufre ont une influence nulle sur le pH, le  $\text{CO}_3\text{Ca}$  neutralisant immédiatement l'acidité due à l'oxydation. Par contre, la dose de 1000 Kg/ha peut abaisser le pH de 0,4 à 0,8 unités dans les sols acides.

Notons que l'emploi du soufre à la dose de 100 à 250 Kg/ha intervient faiblement sur le pH, il suffit d'apporter 2,5 kg de  $\text{CO}_3\text{Ca}$  pour 1 Kg de S afin d'éviter la décalcification.

Dans les régions viticoles, cette action acidifiante est responsable de la dégradation de certaines parcelles de sols non calcaires où les apports répétés du métalloïde ont réduit le pH du sol jusqu'à rendre la vie microbienne et le développement des végétaux impossibles.

b) - Influence sur la minéralisation : Influence défavorable par un retard accentué de la transformation de l'azote organique.

c) - Rapidité du lessivage : Les expériences au laboratoire montrent que le soufre est pratiquement drainé dans la première percolation ce qui entraîne la nécessité d'une fumure annuelle.

d) - Enfin l'étude de l'influence du soufre sur la microflore du sol a été étudiée. Son pouvoir bactéricide intervient certainement mais SIMON et BOISCHOT (1962) constatent que s'il se produit une diminution de l'activité microbologique, cette action n'intervient ni sur les cellulolytiques, ni sur les azotobacters.

2<sup>de</sup> m apporte S natif →  $\text{SO}_4$  → acidification du milieu (lessivage ca).

x S minéral

x bouillies antiparasitaires (S)

Inutile d'apporter S en fumure de fond

{ S natif → acidifiant.  
S minéral → lessivage.

VII<sup>ème</sup> - P A R T I E

LES O L I G O - E L E M E N T S

---

- CHAPITRE I - LE FER  
CHAPITRE II - LE MANGANESE  
CHAPITRE III - LE CUIVRE  
CHAPITRE IV - LE ZINC  
CHAPITRE V - LE BORE  
CHAPITRE VI - LE MOLYBDENE  
CHAPITRE VII - LE CHLORE  
CHAPITRE VIII - LE COBALT

LES O L I G O - E L E M E N T S

Différentes substances ne sont absorbées qu'à très faible dose par les plantes d'où leur nom " oligo-éléments ". En effet, les prélèvements effectués par les végétaux se chiffrent par dizaines ou centaines de grammes par hectare.

TENEUR des PLANTES CULTIVEES EN OLIGO-ELEMENTS PAR MILLION DE MATIERE SECHE ( TROCME - 1960 )

Plantes	Mn	Cu	Zn	B	Mo
Céréales .....	grain	4-8	20-50	2,5- 7	0,4
	paille	3-5	40	1- 8	
Pommes de terre(tubercules)	5	6	8-16	8-15	
Betteraves .....	racines	8		15	
	feuilles	40	3	35	
Légumineuses de prairies	50	10	20	20-50	0,7 -3
Graminées de prairies	75-100	5-10	20	10	0,5 -3

Généralement, les sols sont mieux pourvus d'éléments-traces que d'éléments majeurs, relativement aux besoins des plantes, ainsi que le montre le tableau ci-dessous

TENEUR DES SOLS en ELEMENTS MAJEURS et ELEMENTS TRACES

	ELEMENTS MAJEURS						ELEMENTS TRACES					
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Mo
o/oo Matière sèche des plantes	20	10	2	20	5	20	0,10	0,03	0,03	0,02	0,005	0,002
o/oo de Sol	1	1	1	5 <sup>(2)</sup>	5 <sup>(2)</sup>	15 <sup>(1)</sup>	20	0,6	0,1	0,04	0,02	0,01
Rapport	20	10	2	4	1	1,3	0,005	0,03	0,3	0,5	0,25	0,2

(1) - Inerte en grande partie

(2) - Sols non calcaires



Parmi les légumes, l'épinard et le persil sont particulièrement riches en fer ( 50 à 150 par million de matière fraîche, au lieu de 10 à 20 pour les autres légumes).

Les prélèvements moyens des cultures sont ainsi de l'ordre de 1 à 2 kg de Fer par ha et par an, soit 0,02 % environ du fer présent dans le sol. La question de l'entretien des réserves du sol par restitution des quantités exportées ne se pose absolument pas, contrairement aux éléments majeurs.

Comme le démontre KHAVKIM ( 1964 ), il existe une proportionnalité entre teneur en fer et âge foliaire. D'autre part, comme cet élément est peu mobile, dans les tissus végétaux, on constatera les premiers symptômes des carences sur les tissus jeunes.

## II - FER et SOL

Les formes du fer dans le sol, leur migration et leur évolution sont décrites par SEGALEN ( 1963 ) et DUCHAUFOUR ( 1965 ).

Les sols renferment en général des quantités élevées de fer : 2 % en moyenne. C'est un constituant de plusieurs minéraux primaires ( biotite, hornblende, olivine ) de plusieurs minéraux silicatés secondaires ( montmorillonite, montmorillonite, illite, vermiculite ) et d'oxydes hydratés ( goethite, lépidocrocite, limonite ).

En dehors des minéraux complexes inaltérés, on peut distinguer quatre formes fondamentales du fer :

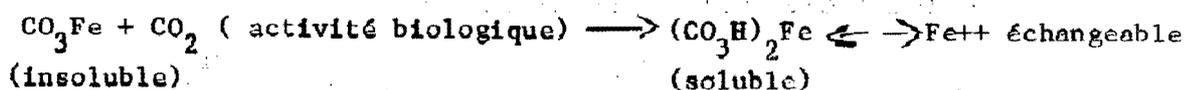
a) - Forme colloïdale : hydrate ferrique englobé dans le complexe argilo-humique ou fixé par lui. C'est la forme courante des sols tempérés à Mull ( sols bruns ) ; les oxydes de fer semblent présents dans ces complexes sous deux formes :

- 1) - forme anionique complexe, englobée dans l'humus ;
- 2) - forme cationique formant un " pont " entre l'argile et l'humus.

Dans certains cas, sols bruns acides, les oxydes de fer seraient intercalés entre les feuillets des argiles.

b) - Forme soluble et échangeable : il s'agit ici de solubilité vraie par opposition à la forme pseudo-soluble définie plus loin : cette forme soluble concerne uniquement le fer à l'état ferreux :  $Fe^{++}$  ; elle est abondante en milieu réducteur, dans les sols hydromorphes riches en matière organique tels que les gley humiques.

D'après MANDAL ( 1961 ) on note les équilibres suivants entre la forme réduite insoluble, la forme soluble et la forme échangeable :



Dans les sols hydromorphes, mais humifères et biologiquement actifs, il peut exister jusqu'à 500 mg/100 g de  $Fe^{++}$  échangeable.

c)- Forme libre et insoluble : hydrate ferrique et formes cristallines. La dégradation de structure, la destruction des complexes argilo-humiques floculés libèrent les hydrates de fer colloïdaux : le sol prend une couleur vive, ocre-rouille. Cette forme colloïdale peut évoluer, soit vers une forme cristalline ( formation de concrétions), soit au contraire vers une forme pseudo-soluble si le fer est " complexé" par la matière organique soluble.

Cet oxyde de fer peut alors former un " film " autour des particules plus grossières et les souder entre elles : c'est l'origine des " concrétions " en général durcies ( CAILLERE et HENIN, 1951). Suivant la nature du minéral ainsi formé et son degré d'hydratation, le sol offre une couleur caractéristique. Si le micro-climat du sol est humide, on trouve de la stilpnosidérite ( $Fe_2O_3 \cdot 2H_2O$ ), de couleur ocre. La goethite, forme peu hydratée, offre une couleur intermédiaire brun-rouge. Enfin, l'hématite, l'oligiste sont rouges. Les concrétions de couleur noire contiennent généralement du manganèse associé au fer.

d)- Formes pseudo-solubles complexées : Certains agents " péptisants " solubles, silice et matière organique, forment avec le fer des complexes pseudosolubles qui empêchent sa précipitation, en milieu aéré et à pH supérieur à 4, alors que normalement elle devrait intervenir dans ces conditions. En milieu pauvre en matière organique et peu acide, il se forme des complexes ferro et ferrisiliciques. En milieu riche en matière organique soluble et acide, il se forme des complexes fer-organique ( BETREMIEUX, 1951)

Tous ces complexes pseudo-solubles, aussi bien les complexes minéraux que les complexes organiques sont électronégatifs, ils sont dispersés, même en milieu neutre ou légèrement alcalin et ils restent stables en présence de calcaire.

On peut donc affirmer qu'en présence de calcaire actif, le fer reste pratiquement insoluble.

e)- Evolution du fer dans les sols : la formation des complexes pseudo-solubles de fer est favorisée par l'acidité, le caractère réducteur du milieu et l'abondance d'éléments complexants, tels que la matière organique soluble ( GREENE, 1963).

La précipitation du fer, ainsi solubilisé, peut intervenir sous l'action de différentes causes, qui agissent le plus souvent en combinaison ; élévation du pH, abondance de l'ion calcium dans les solutions du sol :  $(CO_3H)_2Ca$ , aération du milieu provoquant l'oxydation du fer ferreux. D'autre part, la dessiccation du sol qui intervient en période sèche et chaude favorise la précipitation du fer : en milieu acide les phénomènes d'oxydation et de dessiccation suffisent très souvent à provoquer la précipitation du fer et son évolution sous forme cristalline : c'est l'origine de la formation des concrétions et des cuirasses.

### III - DIAGNOSTIC DU MANQUE DE FER

a) Analyses : L'analyse reflète difficilement le besoin en fer des végétaux ; le fer soluble correspond au fer ferreux, mais comme les milieux réducteurs empêchent la vie des racines, c'est de toute façon à partir du fer ferrique qu'elles s'alimentent. Donc normalement les racines ne peuvent s'alimenter en fer que si elles le dissolvent elles-mêmes par leurs excréments,

à moins que le fer ne soit combiné à des composés minéraux (silice) ou organiques (chélates ou autres) à molécules relativement petites susceptibles de diffuser vers les racines.

Le fer dit libre des sols, c'est-à-dire celui qui n'est plus engagé dans des minéraux primaires et qui s'est déposé à l'état d'enduits minces à la surface des particules minérales ou qui a flocculé avec des composés humiques, est probablement la partie la plus accessible à l'action des racines ou des corps susceptibles de former avec le fer des composés pseudo-solubles.

b) - Symptômes de carence : Les symptômes de carence en fer sont dans la plupart des cas, appelés communément chlorose, encore qu'il existe beaucoup de chloroses ne relevant pas d'une carence ferrique. Ils consistent essentiellement en une décoloration du limbe, qui prend un aspect chlorotique, les nervures pouvant se détacher en vert sur le limbe jaune clair. Ce sont les feuilles les plus jeunes qui sont atteintes en premier lieu. Dans les cas graves, apparaissent des nécroses irrégulièrement réparties dans le limbe, puis les feuilles atteintes tombent prématurément.

#### IV - CAUSES des CHLOROSSES

Ces carences sont sous la dépendance de trois causes principales, susceptibles d'ailleurs d'agir simultanément :

- La chlorose qui se manifeste en terrain calcaire, dite chlorose induite par le calcaire. C'est la plus fréquente. Elle n'affecte cependant qu'un petit nombre d'espèces végétales non adaptées :

- les arbres fruitiers, surtout le poirier sur cognassier, et le pêcher sur franc.
- le fraisier,
- la vigne,
- le rosier,
- quelques plantes annuelles, notamment le lupin jaune.

TROCME (1960) pense que cette chlorose correspondrait à une insolubilisation du fer à cause de la présence de carbonate de calcium ; plus généralement, c'est la réaction alcaline du milieu qui entraverait la mobilisation d'hydroxydes ferriques. Le calcaire a une action d'autant plus marquée qu'il est susceptible de se dissoudre plus rapidement dans les solutions du sol. La détermination du calcaire dit actif permet d'apprécier cette vitesse de dissolution et de connaître ainsi le pouvoir chlorosant d'un terrain donné.

Cependant, en sol calcaire, on assisterait à une utilisation du fer par les plantes par :

- contact direct avec les racines ;
- présence d'une grande quantité de  $\text{CO}_2$  laquelle abaisserait la valeur du pH ;
- excrétion par les racines de substances ayant des propriétés de chélates.

Les espèces chlorosantes seraient capables de prélever du fer en sol calcaire, mais le fer serait rendu insoluble à l'intérieur des plantes et ne participerait plus à leur métabolisme. On a montré notamment que la chlorose due au calcaire s'accompagne d'une modification de la distribution du fer à l'intérieur des plantes, modification que la présence de calcaire ne provoque pas chez les plantes non sensibles à la chlorose. Des études de CARLES et al. (1963) confirmeront cette hypothèse en affirmant que la répartition des éléments paraît primordiale par rapport à leur abondance et que le pétiole aurait un certain rôle dans leur répartition.

De toute façon, les facteurs qui augmentent la dispersabilité du fer dans le milieu calcaire (acidification du milieu notamment) favorisent l'absorption du fer et seraient de nature à diminuer la chlorose.

Les chloroses dues à l'excès d'un élément autre que le fer (antagonisme) par exemple, le cuivre, le cobalt.

Les chloroses dues à l'insuffisance d'un autre élément, exemple le potassium ; l'absorption de K s'accompagnerait d'une augmentation d'acidité favorisant la mobilisation du Fe.

Ces deux derniers types de chlorose sont susceptibles de se manifester en terrains de réactions diverses, même sur des plantes ne souffrant pas de chlorose en terrain calcaire.

A l'inverse il est très rare de constater une toxicité due au fer.

## V - TRAITEMENT

Diverses possibilités, mais toutes également imparfaites, sont offertes pour traiter la chlorose :

- mettre du fer assimilable à la disposition des plantes ;
- rendre plus assimilable (ou utilisable) le fer préexistant dans les sols ou dans les plantes ;
- rendre moins assimilables les éléments se comportant comme des antagonistes du fer, ou provoquer une action inverse sur les éléments se comportant comme synergiques du fer ; (synergie signifie "coefficiencia", c'est-à-dire renforcement mutuel de deux causes indépendantes).

### a) Apport de fer assimilable :

- sulfate ferreux : cette méthode est peu efficiente, car il se produit une insolubilisation très rapide ;
- d'après TROCME (1960) des chélates de fer absorbés par les racines et assez résistant aux attaques des micro-organismes éviteraient la chlorose s'ils sont disposés dans le sol au niveau des racines. Le sel éthylène diamine de l'acide o-hydroxyphénylacétique très stable dans le sol permettrait de lutter pendant quelques années contre la chlorose. Les pulvérisations foliaires des chélates ont donné de très bons résultats.

### b) Mobilisation du fer dans le sol :

- soit par acidification du sol,
- soit par apport de matière organique avec formation de complexes ferro ou ferri-organiques.

En résumé, au point de vue pratique, il est préférable de tenir compte du taux de calcaire actif du sol, avant la plantation de plantes sélectionnées et résistantes au calcaire.

## CHAPITRE II : LE MANGANESE

### I - MANGANESE ET PLANTE

On considère que le manganèse est indispensable pour l'activité maxima de divers enzymes, notamment de décarboxylation et déshydrogénation, qu'il catalyse la réduction des nitrates, et qu'il active en outre un grand nombre de systèmes enzymatiques. Des antagonismes très caractérisés entre fer et manganèse ont été signalés par divers auteurs, mais cette question reste encore controversée. Parmi les espèces les plus sensibles citons : l'avoine, le blé, l'orge, les betteraves, les pommes de terre.

### II - MANGANESE ET SOL

a) Différentes formes : Le chimisme du manganèse dans le sol est loin d'être connu de façon satisfaisante. Les difficultés de cette étude proviennent, pour une large part du fait que cet élément possède plusieurs états d'oxydation et se rencontre dans le sol sous les formes suivantes :

- à l'état d'ion manganoux,  $Mn^{++}$ , échangeable, donc assimilable ;
- à l'état bi, tri, ou tétravalent, sous forme d'oxydes, anhydres ou hydratés, pouvant former des concrétions ou être finement répartis.
- sous forme de sels peu solubles : phosphates, silicates, carbonates ( dans les sols riches en calcaires);
- en liaison organique. Certains auteurs ont considéré que le Mn bivalent pourrait être sous forme de complexe organique inassimilable. A vrai dire, ces formes sont très mal connues à l'heure actuelle. Quoi qu'il en soit, le manganèse est peu assimilable dans les sols riches en humus.

Sans entrer dans le détail, on peut faire encore les remarques suivantes :

1)- L'oxydation du Mn bivalent se fait rapidement à partir de  $pH > 5,5$  et surtout de  $pH 6,2$  à  $7,8$ , par voie biologique essentiellement. A l'inverse, la réduction des formes oxydées, par voie chimique ou biologique, se fait plus facilement à des  $pH$  bas, mais à tout  $pH$  si la tension d'oxygène est assez faible. En l'absence de conditions anaérobies, la forme Mn bivalente, assimilable, se rencontre donc surtout en sols acides. Dans les sols neutres ou calcaires, cette forme tend à disparaître;

2)- Les oxydes supérieurs ( manganiques) sont plus ou moins facilement réductibles. Différentes techniques de laboratoire permettent d'apprécier la fraction dite active ou réductible de ces oxydes.

b) Evolution : Outre les sols très pauvres en Manganèse, toutes les conditions qui favorisent la carence en manganèse sont les suivantes : sols de  $pH$  relativement élevés ( $\leq 6,5$ ) et surtout sols acides dont le  $pH$  a été relevé par apport d'amendements calcaires et riches en matière organique, plus exactement en vieil humus. Il'humidité exagérée du terrain favorise l'apparition des carences, encore que ce point ne soit pas très clair, étant donné que

les conditions asphyxiantes (anaérobies) facilitent en principe le passage du manganèse à des formes réduites assimilables. Les irrigations au moyen d'eaux chargées en matières organiques et en calcaire, favorisent également l'apparition de carences, en raison, d'une part du lessivage du manganèse préexistant, réduit par les matières organiques, et d'autre part de l'enrobage des particules d'argile par les matières organiques et le calcaire, rendant le manganèse restant, peu accessible à l'action des agents réducteurs et dissolvants.

Les risques d'apparition de carence de Mn par apport d'amendements calcaires à des sols de limon ne semblent pas assez graves pour faire renoncer au marnage si celui-ci améliore nettement leur structure, et il serait possible de remédier à la carence éventuelle de Mn par pulvérisations de sels manganéux au moment d'autres traitements pesticides ou herbicides.

### III - DIAGNOSTIC du MANQUE de MANGANESE

a) Analyse : En fait les méthodes d'extraction employées extraient non seulement du Mn échangeable éventuellement présent, mais aussi d'autres formes, telles que du Mn facilement réductible. Ces techniques ne sont cependant pas d'application générale et ne doivent être utilisées qu'avec prudence, l'interprétation des résultats ne devant s'effectuer qu'en fonction des conditions locales.

#### b) Symptômes des carences

Les symptômes généraux consistent en chloroses internerviaires des feuilles, plus diffuses que les chloroses " ferriques ". Ces symptômes présentent des caractéristiques variables avec les espèces. Chez les céréales, et plus spécialement chez l'avoine, particulièrement sensible, la chlorose est accompagnée de tâches décolorées longitudinales, les feuilles atteintes se cassent à angle aigu, la plante perd sa turgescence et prend un port affaissé caractéristique. Chez les arbres fruitiers, les symptômes peuvent ressembler aux premiers symptômes de carence magnésienne. Ils affectent également, en premier lieu, les feuilles les plus âgées.

### IV - PRINCIPES DE LA FUMURE

WOLF et CHAUTARD ( 1964 ) indiquent pour les cultures de maïs une augmentation de 196% pour une dose optimum apportée sous forme de pulvérisations foliaires de  $MnSO_4$

## CHAPITRE III : LE CUIVRE

### I - CUIVRE et PLANTE

Le cuivre a été reconnu comme constituant de divers enzymes d'oxydation : polyphénoloxydase, tyrosinase, laccase, acide ascorbique oxydase. Il accroît la résistance à certaines maladies cryptogamiques. Chez les plantes, il apparaît comme un élément migrateur se portant là où l'activité vitale est la plus grande.

### II - CUIVRE et SOL

Les teneurs varient de 1 à 100 parties par million suivant les sols. trois facteurs principaux interviennent dans l'alimentation en cuivre des plantes dans les conditions naturelles :

- a) - La teneur en cuivre d'un sol est toujours étroitement liée à celle de la roche-mère. Certaines roches éruptives acides (granites, granulites) sont pauvres en cet élément, ce qui explique les carences de cuivre observées en Bretagne.
- b) - L'élévation du pH diminue l'assimilabilité du cuivre, et des carences en cuivre ont été observées en terrains calcaires. A l'inverse, en sol léger acide, le lessivage du cuivre peut entraîner des carences.
- c) - Le cuivre est énergiquement fixé par la matière organique des sols, et des carences en cuivre s'observent en sols riches en vieil humus.

### III - DIAGNOSTIC DES BESOINS EN CUIVRE

a) - Analyse : Aucun réactif d'extraction n'est considéré actuellement comme satisfaisant pour la détermination du cuivre assimilable. Le dosage du cuivre total donne dans certains cas des indications sur les possibilités de carence. COPPENET et CALVEZ (1956) préconisent l'emploi de la méthode au 2-2' biquinolyl ; d'après DUVAL (1963) le seuil de carence pour les sols granitiques de Bretagne se situe à 7-8 mg de Cu par Kg.

Certaines expériences en Allemagne, comme en France, tentent à montrer que la pigmentation des conidies d'Aspergillus Niger permettrait de déceler la teneur du milieu, donc du sol en Cuivre,

b) - Symptômes de carence : D'une façon générale, la chlorose est un des symptômes de carence, mais elle est accompagnée de beaucoup d'autres manifestations, variables avec les espèces. Par exemple, en se limitant aux espèces les plus sensibles. Chez les céréales, on constate une décoloration jusqu'à teinte blanche de la pointe des plus jeunes feuilles avec flétrissement du feuillage.

Chez les arbres fruitiers, on remarque des nécroses marginales des feuilles (comme dans les carences de potasse) et défeuillaison à partir de l'extrémité des pousses.

#### IV - APPORTS

Les apports de cuivre au sol sous diverses formes (sulfate, acétate, certains oxydes) donnent en général des résultats satisfaisants sur plantes annuelles. Des doses moyennes, de l'ordre de 50 kg de sulfate de cuivre par ha pour les premières applications, ont permis d'enregistrer des résultats spectaculaires. Quelle que soit la forme d'application le cuivre est très peu mobile dans le sol (sauf en sol léger), donc les applications au sol sont insuffisantes pour les plantes à racines profondes (arbres fruitiers) et l'on a alors recours à des pulvérisations sur le feuillage ou sur le bois.

L'effet résiduel des produits incorporés dans le sol est assez marqué (de l'ordre de plusieurs années). Il est possible qu'après quelques applications de cet ordre, échelonnées sur une période de 10 ans environ, il devienne inutile ou même dangereux de continuer les apports, lesquels entraîneraient une toxicité marquée (cas des vieilles vignes).

### CHAPITRE IV : LE ZINC

#### I - ZINC et PLANTE

Le zinc fait partie de l'anhydrase carbonique, enzyme catalysant la décomposition de l'acide carbonique en anhydride carbonique et eau. Il entre sans doute également dans la composition de divers enzymes d'oxydation. On considère aussi que le zinc empêcherait la destruction d'auxines, ce qui expliquerait le raccourcissement des entre-nœuds observé chez les plantes carencées en zinc. A noter que la luminosité favoriserait la carence en zinc, vraisemblablement par une activité différente des auxines.

#### II - ZINC et SOL

On trouve dans les sols de 0,05 à 0,01 o/oo de zinc en général, et des extrêmes de 0,01 à 1 o/oo. Les minéraux renfermant du zinc sont assez facilement décomposés, et le zinc libéré est vraisemblablement adsorbé sous forme de cation divalent ou d'ion complexe monovalent.

Les carences ont été observées sur des sols de types très divers, avec des pH variant de 4 à 8, et notamment :

- sols acides lessivés pauvres en zinc ;
- sols ayant reçu des chaulages excessifs ,
- sols légers calcaires riches en acide phosphorique ( condition

fréquente d'apparition en France, dans la moyenne vallée de la Loire en particulier) ;

- sols alcalins riches en matière organique, par suite d'un phénomène de fixation mal connu ou de phénomènes microbiologiques. Inversement en arboriculture, l'engazonnement ou les engrais verts sont susceptibles dans certains cas, d'améliorer la nutrition en zinc des arbres, sans doute parce que les plantes de couverture absorberaient des formes de zinc inassimilables par les arbres et les restitueraient par la suite sous forme plus assimilable.

Notons que la luminosité favorise l'apparition de carences zinciques.

### III - SYMPTOMES DE CARENCE

C'est sur arbres fruitiers que les carences sont le plus fréquemment observées : feuilles petites (elles n'ont parfois que quelques mm de long) - plages chlorotiques sur les limbes - raccourcissement des entre-nœuds provoquant la formation de rosettes au lieu de rameaux qui s'allongent. La vigne et surtout le trône sont également sensibles à la carence.

Chez les plantes annuelles, le raccourcissement des entre-nœuds provoque le nanisme des plantes carencées, dont les feuilles restent petites et souvent déformées.

Plantes sensibles : le lin (carences sporadiques en France), le haricot, le maïs, le houblon. Les céréales autres que le maïs sont peu sensibles.

### IV - TRAITEMENT DES CARENCES

Les applications de sels de zinc au sol risquent d'être inefficaces en sols neutres ou alcalins ; d'autre part le zinc est très peu mobile dans le sol et parvient difficilement à la portée des racines profondes. C'est pourquoi on préconise encore d'une façon générale les pulvérisations. Sur arbres fruitiers à pépins les pulvérisations de sulfate de zinc à 5 % (ou d'oxyde, ou d'oxysulfate), effectuées en fin d'hiver, sont en général efficaces l'année même du traitement. On peut également effectuer des pulvérisations plus diluées en cours de végétation.

L'emploi régulier des fongicides renfermant du zinc doit suffir à écarter les risques de carence en cet élément. Le superphosphate et le sulfate de  $\text{NH}_4$  apportent de petites quantités de zinc.

## CHAPITRE V - : LE B O R E

### I - BORE et PLANTE

Le bore intervient :

- dans l'absorption et le métabolisme des cations, et notamment du calcium;
- dans la formation de la pectine des membranes cellulaires ;
- dans la régulation de l'absorption de l'eau ;
- dans le métabolisme des glucides ( oxydation des sucres)

Il joue également un rôle sur la fécondation de certaines espèces végétales ( vigne). Notons que les monocotylédons sont généralement moins riches en bore que les dycotylédons, surtout les légumineuses, crucifères et ambillifères.

### II - BORE et SOL

On trouve dans les sols de 0,003 à 0,1 o/oo de bore, le plus souvent de 0,01 à 0,025. Le bore présent sous forme de tourmaline ( borosilicate d'aluminium), dans les roches éruptives et métamorphiques est de peu de valeur pour les plantes. Les formes dérivées de sédiments marins ou liées à la matière organique sont plus facilement assimilables.

La détermination du bore extractible à l'eau chaude est susceptible de donner des indications valables sur les disponibilités des sols en bore assimilable par les plantes. Mais les faits expérimentaux manquent encore pour une utilisation sûre de ces données.

Des carences en bore s'observent sur des sols de pH très divers. En culture betteravière, d'après des observations faites en Belgique, c'est au voisinage de la neutralité que les manifestations de carence seraient les plus fréquentes.

pH ( eau)	Pourcentage des cas de carence	
	Terres limo- neuses	Terres sablo- limoneuses
6,0	0	5,5
6,1 - 6,5	5	16,1
6,6 - 7,0	13,6	25,4
7,1 - 7,5	28,0	42,5
7,6 - 8,0	35,2	9,5
8,0	18,2	1,0

Il ne faudrait pas cependant en conclure qu'il y a intérêt à marnier les sols neutres pour favoriser l'alimentation des plantes en bore. En outre, certains sols acides très lessivés sont très pauvres, en bore ; cas de certains sols de vignobles des Pyrénées-Orientales. Les chaulages ( ou marnages) font apparaître ou aggravent en général les symptômes de carence en bore.

La diminution de l'assimilabilité du bore par la sécheresse est un phénomène encore mal expliqué.

### III - LES CARENCES EN BORE

Les symptômes sont très divers suivant les espèces. D'une façon générale, ce sont les parties les plus jeunes, en croissance, qui sont les plus atteintes. La mort du bourgeon terminal, suivie d'un départ de bourgeons axillaires peut donner aux plantes un aspect buissonneux. L'apparition des carences en bore est liée davantage à la nature des plantes cultivées qu'à la nature du sol.

Les plantes les plus sensibles sont les choux-fleurs, les betteraves ( pourriture du coeur), les légumineuses fourragères ("jaune" de la luzerne), les pommes de terre, le céleri ( tige craquée), la vigne, les arbres fruitiers ( taches liégeuses dans le fruit et troubles de végétation) Par contre les céréales sont peu sensibles.

### IV - TRAITEMENT DES CARENCES

Les doses toxiques sont souvent de peu supérieures aux doses utiles et les applications de borax ne doivent être effectuées qu'avec prudence, d'autant plus que la sensibilité aux excès est très variable avec la nature des cultures. Les applications répétées de borax en culture betteravière peuvent accroître peu à peu le pouvoir alimentaire du sol, mais ne présentent pas, dans les conditions actuelles, un caractère dangereux

On a proposé récemment des produits moins solubles que le borax, notamment les verres frittés aux borosilicates qui risqueraient moins d'être toxiques, tout en ayant une action plus soutenue. De tels produits ont été encore peu expérimentés jusqu'à présent ; les premiers résultats signalés semblent encourageants.

## CHAPITRE VI - : LE MOLYBDENE

### I - MOLYBDENE ET PLANTE

Le molybdène joue un rôle important dans le métabolisme de l'azote. Il ferait partie de la réductase du nitrate, et sa carence provoque une accumulation de nitrates dans les plantes ( ce qui n'est d'ailleurs pas spécifique de la carence en molybdène) et une diminution de la teneur en acides aminés. Il est probable qu'il joue un rôle dans la synthèse de l'acide ascorbique et dans le métabolisme des substances pectiques. Le molybdène apparaît également comme essentiel pour les bactéries fixatrices d'azote. Les plantes les plus sensibles appartiennent à la famille des légumineuses et des crucifères ; certaines variétés comme le trèfle fixeraient de grandes quantités de molybdène ce qui entraînerait des risques de maladies sur le bétail

### II - MOLYBDENE et SOL

On trouve dans le sol de 0,1 à 5 parties de Mo par million en moyenne. Des teneurs élevées ( 200 ppm) ont été trouvées dans certaines roches sédimentaires argileuses.

L'assimilabilité du molybdène, contrairement à celle des autres oligoéléments, croît avec le pH, en sorte que le chaulage des terres acides augmente considérablement les quantités de molybdène à la disposition des plantes. La présence de matière organique facilite également l'absorption du molybdène par les plantes, et peut contrebalancer l'influence de l'acidité. La richesse du milieu en acide phosphorique est également un caractère considéré comme augmentant l'assimilabilité du molybdène.

Divers réactifs d'extraction ont été proposés pour l'estimation du molybdène assimilable, certains ( acide acétique, oxalate acide, etc...) semblent fournir de bonnes corrélations avec les observations faites sur le terrain, dans les pays où les carences en molybdène sont relativement fréquentes ( Nouvelle-Zélande, Australie, Ecosse).

### III - CARENCES en MOLYBDENE

Les plantes cultivées les plus sensibles sont : les brassicées ( chou-fleur, chou de Bruxelles notamment), les plantes de prairies ( légumineuses, ray-grass), le pois, l'avoine, l'épinard, la tomate, la laitue, les citrus. Un caractère assez général est la moucheture chlorotique des feuilles et l'apparition de chloroses marginales. Chez le chou-fleur, les limbes sont à peine formés, laissant nues les grosses nervures médianes, avec dépérissement du bourgeon terminal.

#### IV - TRAITEMENT DES CARENCES

Deux possibilités de traitement sont offertes : le relèvement du pH ou l'application de molybdène à des doses de l'ordre du Kg de molybdène au maximum ( molybdate d'ammonium par exemple), accompagnée, le cas échéant, d'une fumure phosphatée. Le deuxième traitement est parfois plus recommandable, les chaulages énergiques risquant de provoquer des carences en d'autres oligo-éléments ( notamment dans le cas de prairies, des carences en cobalt sur le bétail).

Le molybdène en excès dans l'alimentation animale provoque des troubles graves. De tels excès ont été observés en terres naturellement riches en molybdène, terres dérivées du lias inférieur notamment, ou à la suite d'applications inconsidérées de molybdates sur prairies, ne fût-ce que de quelques kilog.

---

#### CHAPITRE VII - : LE CHLORE

La nécessité du chlore pour les végétaux a été établie grâce aux cultures sur milieu artificiel. La carence en chlore provoque des chloroses et des nécroses, le flétrissement de la pointe des feuilles, et dans les cas graves, empêche la plante de fructifier. Cette carence est exceptionnelle dans les conditions naturelles ; en effet, les précipitations apportent au sol des quantités de chlore variant, suivant l'éloignement de la mer, de 5 à 500kg par ha et par an environ, et sont presque toujours suffisantes pour assurer les besoins des cultures. De plus beaucoup d'engrais chimiques ou de pesticides contiennent du chlore.

---

#### CHAPITRE VIII - : LE COBALT

Il n' a pas été prouvé jusqu'à présent que le cobalt soit nécessaire aux plantes, mais on sait qu'il est indispensable aux animaux, et à ce titre les conditions de l'alimentation des cultures en cet élément méritent d'être étudiées. De plus, le cobalt jouerait un rôle essentiel dans la fixation symbiotique de l'azote par les légumineuses.

La teneur en cobalt du sol varie de 0,001 à 0,1 o/oo. Les sols dérivés de roches acides ( granites, rhyolites) et de nombreuses roches sableuses sont en général pauvres, alors que les sols dérivés de roches alcalines ou de sédiments argileux sont beaucoup plus riches. Des carences ont également été observées en terrains calcaires. L'assimilabilité est plus élevée en milieu acide qu'au voisinage de la neutralité.

On suppose que le cobalt assimilable par les plantes se trouve sous forme adsorbée par le complexe argilo-humique, mais les normes ne sont pas encore définies avec précision.

La carence en cobalt intervient surtout sur la santé des animaux et principalement des bovins et ovins ( NouvellesZélande-Australie), mais il suffit d'un apport de 2 à 3 kg de sulfate de cobalt à l'hectare pour éviter les troubles physiologiques.



Départements	Consommation		Départements	Consommation	
	total en t K2O	en kg K2O par ha		total en t K2O	en kg K2O par ha
Ain	8.243	23,82	Lot	1.961	7,42
Aisne	33.846	63,11	Lot-et-Garonne	8.860	23,87
Allier	6.480	11,06	Lozère	157	0,51
Basses-Alpes	2.702	8,99	Maine-et-Loire	15.988	27,68
Hautes-Alpes	1.293	4,90	Manche	14.130	23,91
Alpes-Maritimes	1.969	12,95	Marne	47.723	87,84
Ardeche	1.870	6,61	Haute-Marne	4.771	14,77
Ardennes	9.139	27,39	Mayenne	17.262	38,11
Ariège	1.117	4,58	Meurthe-et-Moselle	4.477	15,18
Aube	22.851	64,19	Meuse	6.017	16,48
Aude	9.094	22,93	Morbihan	12.305	25,39
Aveyron	1.866	3,05	Moselle	4.500	11,82
Bouches-du-Rhône	11.380	54,76	Nievre	4.414	10,60
Calvados	16.196	35,48	Nord	30.653	69,32
Cantal	660	1,61	Oise	26.322	60,46
Charente	10.579	24,05	Orne	11.046	22,60
Charente-Maritime	12.954	25,47	Pas-de-Calais	29.989	55,89
Cher	12.141	23,97	Puy-de-Dôme	1.613	3,17
Corrèze	750	2,74	Basses-Pyrénées	11.547	36,62
Corse	1.199	2,88	Hautes-Pyrénées	3.440	15,74
Côte-d'Or	12.470	28,13	Pyrénées-Orientales	3.948	23,24
Côtes-du-Nord	19.627	37,54	Bas-Rhin	7.044	27,31
Creuse	3.336	8,48	Haut-Rhin	5.633	29,11
Dordogne	6.168	14,18	Rhône	3.440	19,19
Doubs	3.188	10,13	Haut-Saône	4.020	14,98
Drôme	7.698	25,43	Saône-et-Loire	6.250	10,15
Eure	21.379	51,94	Sarthe	15.401	31,70
Eure-et-Loir	34.734	71,18	Savoie	1.108	5,03
Finistère	19.361	39,41	Haute-Savoie	1.796	8,22
Gard	9.991	34,03	Seine	1.002	(1)
Haute-Garonne	5.154	10,48	Seine-Maritime	25.594	56,91
Gers	10.247	20,40	Seine-et-Marne	31.174	79,95
Gironde	7.115	18,15	Seine-et-Oise	25.003	75,53
Hérault	10.884	31,27	Deux-Sèvres	9.592	18,58
Ile-et-Vilaine	20.382	37,71	Somme	35.229	68,43
Indre	9.845	19,58	Tarn	3.257	8,28
Indre-et-Loire	43.361	31,70	Tarn-et-Garonne	6.329	23,04
Isère	8.859	23,66	Var	3.449	20,31
Jura	2.508	9,32	Vaucluse	10.679	74,89
Landes	11.308	56,51	Vendée	16.507	27,97
Loir-et-Cher	19.821	51,75	Vienne	9.761	18,53
Loire	2.336	7,81	Haute-Vienne	2.640	6,79
Haute-Loire	410	1,52	Vosges	2.741	11,97
Loire-Atlantique	18.118	34,60	Yonne	15.425	40,44
Loiret	21.763	49,00	Territoire de Belfort	300	9,68

(1) Le cas spécial du département de la Seine n'a pas donné lieu au calcul de la consommation par ha de surface susceptible de recevoir des engrais.

## CHAPITRE VI : PRATIQUE DE LA FUMURE POTASSIQUE

### I - BILAN DE LA POTASSE DANS UNE EXPLOITATION

#### (A) - Pertes par drainage

Les mouvements verticaux de K dépendent de la teneur en argile, de la nature de ces argiles, du degré de saturation du complexe absorbant. D'après BARBIER et TROCME (1962) les pertes par drainage ont été de 4 kg  $K_2O$  par hectare et an dans les cases lysimétriques de Versailles, à la base d'une couche de 50 cm pauvre en potasse, avec un degré de saturation en potassium de 1,3 % (alors que l'optimum est environ de 4 %). Dans un sol où le degré de saturation en potassium serait de 4 %, elles atteindraient au moins 12 kg par an.

On peut tabler sur une perte de 15 à 20 kg/an par hectare, à la base de la couche labourée. Cette perte augmente avec l'intensité annuelle du drainage (augmentation des bicarbonates lessivés ; augmentation du rapport K/Ca en solution par dilution). Dans les sols sableux, recevant des fumures potassiques optimales, où le degré de saturation en potassium se trouve porté au moins temporairement à un niveau élevé, la perte annuelle de potasse est plus importante.

#### (B) - Exportations

Les exportations dépendent avant tout de la richesse du sol aussi nous nous baserons sur une teneur optimale.

1)- Exportations par les produits vendus : Il suffit de déterminer par analyse la richesse des différentes récoltes.

2)- Exportations suivant le type d'exploitation :

a) Cas d'une exploitation de grandes cultures : Tous les produits sont exportés il suffit de calculer la quantité de  $K_2O$  exportée ; cette quantité peut atteindre 200 kg/ha pour une ferme céréalière avec culture de pommes de terre.

b) Cas d'une ferme d'élevage avec vente de produits transformés (Lait, viande) : Si les pertes de potasse pour les purins et excréments non récupérés sont négligeables, que la répartition de ces mêmes résidus s'effectue uniformément sur toute la surface de l'exploitation, la quantité de potasse exportée ne dépasse jamais quelques dizaines de kg par hectare. Le sol de telles fermes peut devenir ou rester pauvre en potasse, si l'on n'a pas encore employé d'engrais potassique ; ceci à l'exclusion des pièces où l'on concentrerait les fumiers et les purins.

c) En pratique, la plupart des fermes s'échelonnent entre ces deux cas extrêmes.

#### (C) - GAINS

Eventuellement potasse des aliments du bétail ou des engrais potassiques achetés au dehors, ne pas oublier que la libération du potassium par décomposition des minéraux primaires correspond à un gain de potassium actif et jouant le même rôle qu'un apport d'engrais potassique.

## II - NIVEAU OPTIMUM DE K DANS UN SOL

Ce niveau optimal défini par une certaine teneur en  $K_2O$  dépend de plusieurs facteurs dont nous avons étudié l'influence en détail précédemment :

- Valeur de la capacité d'échange liée à la nature des argiles.
- Système de culture envisagé,
- Contrôle de l'évolution de la teneur en  $K_2O$  échangeable par les analyses.

En principe, trois cas peuvent se présenter :

### A - Nécessité d'augmenter le niveau du potassium échangeable d'un sol.

Il faudra en général et en fonction du complexe absorbant, appliquer des doses supérieures aux exportations afin d'obtenir un rendement maximum. A noter que dans ces cas la diminution du K échangeable est inférieure au déficit du bilan grâce à la libération du K temporairement fixé ; à l'inverse pour augmenter la teneur d'une certaine quantité il faudra incorporer davantage d'engrais. Le rythme de l'enrichissement sera étroitement lié à l'aptitude des argiles de fixer du potassium à l'état non échangeable.

### B - Taux optimum de K échangeable contrôlé par l'expérience en plein champ

Il suffit alors d'effectuer des doses d'entretien en fonction de l'assolement et des exportations et de les majorer d'un coefficient de sécurité avoisinant 20 %. Si le bilan de fumure est en équilibre le taux de K échangeable varie peu en cours de rotation et ce régime d'entretien permettra de négliger les oscillations dues aux équilibres du complexe absorbant. Un contrôle d'analyse s'avèrera utile chaque 5 ou 10 ans.

### C - Taux de $K_2O$ échangeable dépassant nettement l'optimum ( $> 0.35$ o/oo)

L'agriculteur a intérêt à supprimer les apports de sels de potasse pendant un nombre d'années limité, sauf peut-être pour des plantes particulièrement exigeantes ( colza, pomme de terre). Cependant là encore il faut tenir compte, pour obtenir des rendements maxima, de l'effet particulier de la vieille graisse potassique, effet que l'expérimentation des engrais, selon la méthode habituelle, ne peut pas mettre en évidence.

D - En résumé, d'après BLANCHET et al. (1965) : La fertilisation devra donc être adaptée à chaque type de sol car une réserve importante n'est pas nécessaire dans ceux qui cèdent facilement leurs ions  $K^+$ , il est d'ailleurs probable que ces sols s'avèrent difficiles à enrichir en raison de leurs faibles propriétés de rétention. La fumure doit par contre être très bien adaptée aux besoins des cultures.

Les terres riches en argiles illitiques, possèdent des réserves importantes même lorsqu'elles n'ont reçu que des fumures potassiques très faibles ; c'est un signe manifeste de leur rétention assez énergique du potassium. Cette abondance de réserves ne signifie pas toujours que les plantes

soient bien alimentées et si, la fumure peut être plus souple, elle ne doit pas être négligée sauf si l'expérimentation n'a pas prouvé son utilité au cours d'un nombre d'années suffisant.

En conclusion, comme nous l'avons vu, à part des types de sols bien définis, il ne faut pas s'attendre à une réponse aux engrais potassiques aussi spectaculaire que pour les engrais azotés et phosphatés.

D'après la nature du sol il faudra envisager un enrichissement progressif pour un apport de fumure de redressement pouvant atteindre des doses doubles des exportations.

A l'inverse, sauf cas exceptionnels, les fumures d'entretien ne devront pas être négligées, même si les rendements ne fléchissent pas immédiatement, et comme l'a constaté HEBERT (1964) l'enrichissement progressif peut conduire à long terme à des augmentations de rendement dans le cas de certaines cultures.

VI<sup>ème</sup> P A R T I E

E L E M E N T S M I N E U R S

- CHAPITRE I - MAGNESIUM ET SOL
- II - MAGNESIUM ET PLANTE
- III- DIAGNOSTIC DES BESOINS
- IV - PRINCIPES DE LA FUMURE
- V - SOUFRE ET PLANTE
- VI - SOUFRE ET SOL
- VII- DIAGNOSTIC DES BESOINS EN SOUFRE

## VI° PARTIE : ELEMENTS MINEURS

### CHAPITRE I : MAGNESIUM & SOL

#### I - ETAT NATUREL

La teneur en magnésie totale ( MgO ) des sols français se situe entre 1 et 20 o/oo de terre sèche. Les teneurs les plus élevées correspondent à des terres dérivant de roches d'origine éruptive, ou de formations sédimentaires calcaires. Dans les terres de limon, les teneurs moyennes sont de 3 à 6 o/oo. Les teneurs en MgO dépassent donc parfois les teneurs en CaO, plus rarement en K<sub>2</sub>O.

Le magnésium des sols s'y trouve principalement sous forme de combinaisons silicatées, ou sous forme de carbonate associé au carbonate de calcium ( dolomie ).

#### II - EVOLUTION DU MAGNESIUM DANS LES SOLS

##### A - Mg échangeable

Comme le calcium, le magnésium du sol se dissout en forte proportion ( de l'ordre de 75 % ) dans les acides concentrés. Les réserves du sol en Mg apparaissent donc comme se trouvant sous des formes moins résistantes que les réserves en K, élément peu soluble dans les acides. Cependant une petite fraction seulement de Mg total, 2 à 10 % environ, est échangeable. Parmi les cations échangeables du sol, Mg est en général beaucoup moins abondant que Ca, mais souvent plus abondant que K, bien que Mg total soit généralement inférieur à K total.

Mg échangeable est susceptible de passer partiellement sous forme non échangeable, comme K, mais dans une plus faible mesure. La libération de Mg à partir de Mg non échangeable est plus lente que celle de K à partir de K non échangeable. Il semble donc que le dosage de Mg échangeable puisse fournir une bonne indication sur la capacité actuelle du sol à alimenter les plantes en cet élément. Cependant, l'alimentation des plantes en Mg ne dépend pas seulement de la teneur du sol en Mg échangeable, mais aussi, comme on vient de le voir, de l'action antagoniste d'autres cations. Par ailleurs, en terre calcaire, le dosage de Mg échangeable peut être faussé par la dissolution du carbonate de Mg toujours présent dans le calcaire.

##### B - Migration

La rétention du magnésium échangeable par le complexe absorbant du sol n'est pas très énergique, en sorte que le magnésium, comme le calcium, peut être entraîné en profondeur. Les matières humiques facilitent cet entraînement. Le magnésium entraîné est partiellement retenu dans l'horizon d'accumulation, comme la plupart des éléments. Les pertes moyennes de MgO par entraînement dans les eaux de drainage sont difficiles à chiffrer en culture. Dans les cases lysimétriques cultivées de Versailles, elles varient, suivant les années et les cultures, de 20 à 40 kg MgO par ha et par an, c'est-à-dire par an 2,8 à 6 % du Mg échangeable de la couche labourée. Les pertes de MgO sont plus fortes que celles de CaO par rapport à la quantité existante ( pour CaO : 1,2 à 4,3 % environ ). L'importance de ces pertes par lessivage

varie bien entendu avec les conditions naturelles ( importance des précipitations, nature du terrain) et les méthodes culturales ( emploi de produits acidifiants notamment).

## CHAPITRE II : MAGNESIUM et PLANTE

### I - ROLES PHYSIOLOGIQUES DU MAGNESIUM

Le magnésium ( Mg) est un constituant de la chlorophylle, dans la proportion de 2,7 %.

- Il intervient dans l'absorption et le transfert du phosphore vers les graines ;
- Il entre dans la constitution de la phytine ;
- Il intervient dans la formation des lipides, sans doute en tant que véhicule du phosphore ;
- Il favorise la formation de la xanthophylle et du carotène ;
- Il contribue au maintien de la turgescence cellulaire optimale.

### II - EXPORTATION

Teueur moyenne des plantes en magnésie d'après TROCMEs

P l a n t e s		MgO dans 100 g. de matière sèche ( en grammes )	
Céréales	{ graines .....	0,13	- 0,25
	{ pailles .....	0,10	- 0,20
Colza	{ graines .....	0,30	- 0,40
	{ pailles .....	0,15	- 0,20
	{ siliques .....	0,25	- 0,40
Betteraves sucrières	{ racines .....	0,25	
	{ feuilles .....	0,30	- 1,00
P. de terre	{ tubercules .....	0,10	- 0,25
	{ fanes .....	0,50	- 1,00
Plantes de prairie	{ légumineuses .....	0,70	- 1,00
	{ graminées .....	0,20	- 0,50
Légumes	{ épinards .....	0,80	- 1,50
	{ laitues .....	0,20	- 0,50
	{ choux .....	0,40	
	{ poireaux .....	0,50	
Feuilles de pommiers ou poiriers .....		0,50	- 1,00
Fruits frais, pour cent de matière fraîche :		0,01	- 0,02

### III - ABSORPTION PAR LES PLANTES

Le magnésium est un élément relativement mobile à l'intérieur des plantes et susceptible de se transporter rapidement, en cas d'insuffisance de l'alimentation, des organes âgés aux organes jeunes ; c'est pourquoi les symptômes de carence en magnésium affectent en premier lieu les parties les plus âgées des végétaux.

L'action antagoniste du potassium vis-à-vis du magnésium a été souvent observée, aussi bien dans des essais en milieu synthétique que dans les conditions habituelles de culture : l'enrichissement en potassium du milieu diminue l'absorption du magnésium par les plantes. C'est ce phénomène qui est dans certains cas à l'origine d'insuffisance de nutrition magnésienne des cultures. L'antagonisme du calcium vis-à-vis du magnésium est moins marqué et moins régulier que l'antagonisme potassium-magnésium. Quant à l'antagonisme hydrogène/magnésium, supposé par certains auteurs, il est considéré par d'autres comme relevant uniquement d'un mauvais développement des racines en milieu acide. Les ions ammonium sont également considérés comme pouvant entraver l'absorption du magnésium, par leur action propre et par l'acidification qu'ils produisent. Inversement, le magnésium en excès peut avoir une action antagoniste vis-à-vis d'autres éléments ( potassium)..

Il faut remarquer que la tétanie d'herbe ( hypomagnésie des animaux) résulte également d'un déséquilibre entre la teneur en Mg et K des tissus végétaux ( KEMP - VOISIN, 1964).

## CHAPITRE III : DIAGNOSTIC DES BESOINS

### I - SYMPTÔMES DE CARENCE

Bien que le magnésium soit en quantité relativement élevée dans les graines, c'est sur l'appareil végétatif qu'apparaissent surtout les symptômes de carence ; ces symptômes, variables avec les espèces - et parfois avec les variétés - présentent les caractères généraux suivants, plus ou moins accentués, suivant l'intensité de la carence.

Le magnésium étant un constituant de la chlorophylle, la carence de cet élément provoque des chloroses de certaines parties du limbe pouvant se transformer progressivement en nécroses. Chez certaines plantes, comme la vigne, le maïs, on peut observer, au lieu de chloroses, des colorations rougesâtres par formation d'anthocyanes. Comme pour beaucoup d'autres carences, les symptômes se répartissent à peu près symétriquement par rapport à la nervure médiane.

Les symptômes apparaissent en premier lieu sur les feuilles les plus âgées, et gagnent peu à peu les plus jeunes. Les feuilles atteintes se détachent prématurément, en particulier chez les arbres fruitiers.

Comme plantes sensibles il est possible de signaler : la pomme de terre ( au moins certaines variétés ) la tomate, la betterave sucrière, la vigne, le framboisier, le rosier.

## II - ANALYSE DES SOLS

SCHACHTSCHABEL adopte les limites suivantes, valables pour des plantes annuelles :

- Sols sableux ..... 0,08 o/oo MgO échangeable  
(extractible par une solution aqueuse de chlorure de calcium)
- Sols de limon ..... 0,11
- Sols argileux ..... 0,19

Les sols pauvres sont surtout des sols légers acides, fortement lessivés ( podzoliques). Toutefois, des insuffisances de magnésium ont été observées dans tous les types de sols et à tous les pH. En fait il faut aussi tenir compte, en dehors des facteurs naturels, des conditions de culture ( par exemple, emploi intensif d'engrais potassiques, créant un déséquilibre par insuffisance de Mg ou de produits acidifiants).

## CHAPITRE IV : PRINCIPES DE LA FUMURE

### I - EXPORTATIONS

On évalue les exportations de magnésium ( MgO) par les récoltes à 20-35 Kg/ha, compte tenu des restitutions par les pailles et les déchets. En outre, le lessivage correspondrait à des pertes de l'ordre de 15-30 kg par an ( la rétention de MgO dans le sol n'est pas très énergique), si bien que le sol s'appauvrirait en moyenne de 40-60 Kg de magnésium par an.

### II - APPORTS

Les apports de magnésium dans le sol peuvent avoir plusieurs origines :

- précipitations atmosphériques en fonction des régions ( plus accusées aux bords des océans).

- fumiers : en moyenne 2 kg de MgO par tonne, mais richesse assez variable.

- amendements magnésiens : dosant de 20 à 35 % de MgO, suivant qu'il s'agit de dolomies ou de chaux magnésiennes. Leur emploi à la dose de 1 à 3 t. apporte 350 à 600 Kg de MgO/ha, sous forme de carbonates.

- engrais : contenant de la magnésium. On peut citer le nitrate de chaux et de magnésium ( 8% MgO), le Patent Kali (8% MgO), les scories Thomas (2 à 5% MgO), Super (0,5); (NO<sub>3</sub>), Ca (0,2).

- sulfate de magnésium : ( 16 % MgO). Dans les sols à pH élevé, ce produit pourra remplacer les amendements magnésiens, à la dose de 4 à 700 Kg/ha. On l'emploie également en pulvérisations répétées sur arbres fruitiers (2%).

## CHAPITRE V : SOUFRE ET PLANTE

### I - ROLES du SOUFRE

1°) En tant que constituant indispensable de la cellule des végétaux supérieurs, le soufre joue un rôle " plastique " ou constructeur qui intervient dans le métabolisme de l'azote. En son absence l'azote soluble s'accumule ; la synthèse des matières protéiques n'a pas lieu ; le soufre devient le facteur limitant du développement et la plante ne peut plus former ses tissus quelles que soient les quantités des autres éléments dont elle dispose.

COIC insiste sur l'équilibre qui, entre S et N, doit être respecté à tout moment du cycle végétatif ; cet équilibre a beaucoup d'importance pour les plantes de prairies et, notamment pour les graminées de prairies. Toutefois, il faut remarquer que la possibilité du stockage du soufre à l'état d'ion  $SO_4$  doit être beaucoup plus grande que celle qui concerne  $NO_3$ .

2°) D'après HOFMANN, les sulfates soutiennent l'action de la potasse sur les phénomènes d'assimilation. En cas d'excès de potasse, les sulfates agissent même comme régulateurs et rétablissent l'équilibre métabolique. Ses travaux prouvent aussi les effets d'interaction des ions  $SO_4$  et Cl sur l'activité enzymatique et sur divers aspects du métabolisme des plantes.

3°) La carence en soufre affecte essentiellement la photosynthèse qui ne peut s'effectuer normalement ; la chlorose qui la traduit se manifeste surtout au cours des premiers stades de la végétation ; les feuilles jaunissent les plantes restent chétives. Comme la majeure partie du soufre protéique de la feuille se trouve dans les chloroplastes, on conçoit que la photosynthèse soit réduite.

4°) Il ne faut pas oublier que par l'intermédiaire des végétaux, le soufre joue un grand rôle dans la physiologie animale et humaine.

### II - ABSORPTION par les VEGETAUX

Si l'alimentation des plantes en soufre s'effectue essentiellement à partir des sulfates, des expériences ont prouvé que les plantes et les tissus végétaux possèdent le pouvoir d'assimiler le soufre organique. Dès 1937, BARBIER démontre que l'excès de soufre ne provoque aucune modification dans la nutrition minérale des plantes ( pas de consommation de luxe ) et n'entraîne aucun effet toxique direct. A noter que des expériences au  $^{35}S$  indiquent une fixation élective du soufre dans les organes jeunes ou en voie de croissance.

D'autre part, s'il existe une synergie d'absorption très nette entre S et N, on constate un antagonisme avec le chlore et le sélénium. Le S est présent dans les plantes sous plusieurs formes avec prédominance de l'une ou l'autre en fonction du stade végétatif et des organes.)

- migrations et mise en réserves : S minéral  $SO_4$

- transformation en S organique par réduction presque complète dans les grains mûrs, mais incomplète pour les autres organes. Les formes organiques les plus fréquentes sont les acides thioaminés (cystine méthionine) et les hétérosides soufrés.

### III - EXPORTATIONS

Si la composition élémentaire des tissus végétaux ne permet pas de classer le soufre, le calcium et la magnésie dans les éléments majeurs, il ne faut pas les assimiler aux oligo-éléments. En effet, très souvent le rapport S/P est élevé:

luzerne	: 1,06	Avoine	: 0,61
trèfle	: 1,17	Maïs	: 0,47
colza	: 1,56	Blé	: 0,44
Orge	: 0,80		

Les exportations moyennes peuvent se résumer dans le tableau suivant, publié en 1963, par la société des superphosphates.

Nature de la culture	Rendement	Exportations
Blé .....	40 qx	Grain ..... 5,4 à 8 kg/ha Paille ..... 5 à 9 "
Orge .....	30 qx	Grain ..... 4,2 à 7 " Paille ..... 6 à 10 "
Maïs .....	50 qx	Grain ..... 8,5 à 12 "
Colza .....	30 qx	Grain ..... 25,2 à 36,6 "
Pommes de terre .....	30 tonnes	..... 9,5 à 13 "
Betteraves sucrières décolletées .....	48 tonnes	..... 16 à 18 "
Luzerne .....	70 qx	..... 15 à 30 "
Trèfle violet .....	70 qx	..... 8 à 18 "

En résumé on peut classer :

- Les plantes dont les besoins sont élevés, pouvant aller jusqu'à 80 kg à l'ha, parce qu'elles contiennent des composés soufrés, ex : colza, chou, moutarde, ail, oignon, etc.,...

- Les plantes dont les besoins sont importants, de l'ordre de 40 kg/ha. car elles forment une grande quantité de protéines, ex. : légumineuses, plantes fourragères.

- Les plantes qui n'entrent pas dans les catégories précédentes et dont les besoins totaux sont moins importants ( 25 kg/ha) mais qui ont, néanmoins, des exigences de pointe à certains stades critiques, ex : céréales.

Toutefois, comme pour les autres éléments, il ne faut pas négliger la période critique au moment de la croissance active surtout au moment des périodes de lessivage intense. Dès 1960, COIC et LEFEBVRE indiquaient les risques de déficience en soufre pour l'alimentation normale des blés d'hiver avec symptômes nets de carence à la montaison.

## CHAPITRE VI : SOUFRE ET SOL.

### I - ETATS NATURELS

Le soufre est présent en très faibles quantités dans les sols. Globalement, la teneur en soufre de la croûte terrestre est de 0,12 %, équivalente à celle du phosphore, au 1/20 du potassium et du sodium, au 1/30 du calcium.

S = 0,12 % - P = 0,12 %      Mg = 2,24 %  
K = 2,46 % - Na = 2,46 %      -      Ca = 3,47 %

Sa répartition à l'état minéral se complète par une présence dans les eaux naturelles, ce qui justifie la classification suivante :

a) Soufre natif : Rassemblé en gisements à plus ou moins haute teneur, le soufre natif se trouve dans les régions volcaniques actuelles ou anciennes. Il se présente sous forme de minéral.

b) Roches sulfatées : Comme pour le phosphore, les roches primitives anciennes (granit, gneiss, schistes) ne contiennent que de faibles quantités de soufre tandis que les roches volcaniques (basalte) sont mieux pourvues. Les roches sulfatées apparaissent essentiellement dans les dépôts sédimentaires; la plus répandue est le sulfate de calcium hydraté (gypse  $SO_4 Ca, 2 H_2O$ ) issu de l'altération de l'anhydrite (sulfate de calcium anhydre) par absorption d'eau avec augmentation de volume.

c) Sulfures métalliques : Les sulfures métalliques naturels constituent des gisements de pyrites (sulfure de fer), de blendes (sulfure de zinc), de chalcosine (sulfure de cuivre), de galène (sulfure de plomb). Les pyrites sont avant tout considérées comme une source de soufre, tandis que dans la blende et dans la chalcosine traitées par la métallurgie, le soufre ne représente qu'un sous-produit.

d) Hydrogène sulfuré : Certains pétroles et gaz naturels contiennent de notables quantités de soufre, généralement sous forme de  $SH_2$ , provenant, semble-t-il, de la réduction du gypse par les carbures d'hydrogène. On l'extraît par des traitements chimiques de raffinage, soit sous forme élémentaire, soit sous forme d'acide sulfurique : c'est du soufre de récupération et d'épuration. Des disponibilités considérables en cet élément sont ainsi apparues dans notre pays : 1,4 million de tonnes par an, à partir de 1962 (Lacq)

e) Les eaux naturelles : Ceci tient à ce que le soufre est surtout présent dans les sols sous forme de combinaisons organiques dont l'évolution libre des produits, tant oxydés que réduits, qui sont le plus souvent solubles, à l'exception du sulfure de fer.

*g) libération du S organique à partir  
des réserves du sol.*

## II - EVOLUTION dans les SOLS

La teneur en S total des sols agricoles se situe généralement entre 0,2 et 0,5 ‰, soit 600 à 1500 Kg/ha.

a) Minéralisation : La majeure partie du soufre total des sols (75 à 90 %) se trouve sous forme de combinaisons organiques ; il n'a pas encore été démontré que des acides aminés tels la cystine et la méthionine participent en quantité importante à la constitution des composés humiques. Cependant la teneur en soufre de la matière organique du sol est relativement peu variable, dans un milieu sol-climat de type donné, de même que le rapport soufre-carbone (analogie avec le rapport azote-carbone). En milieu aéré, ce soufre organique se minéralise progressivement à l'état de sulfate. Mais inversement, du soufre minéral peut passer à l'état organique par apport de matière organique pauvre en soufre. Dans un sol maintenu en équilibre humique la minéralisation du soufre pendant certaines phases de la rotation est compensée par l'organisation du soufre à d'autres moments. Pour entretenir la fertilité, la totalité du soufre exporté par les récoltes et par drainage doit être compensée par des apports correspondants.

En effet, ce sont les ions  $SO_4$  qui constituent la forme assimilable par les végétaux. Selon VINCENT (1935) la matière organique des sols acides est moins riche en N et S que celle des sols neutres ou alcalins. Sans insister sur le côté microbiologique de cette minéralisation, notons que dans certaines conditions d'anaérobioses des processus de réduction interviennent avec transformation des sulfates en sulfure ; ceci se traduit par une odeur caractéristique ( $H_2S$ ) se dégageant de matière organique située à des niveaux réducteurs (vieille prairie à gley - stagno-gley). Il peut également se former du sulfure de fer noir insoluble dont la présence est l'indice d'un milieu très toxique pour les racines.

En pratique, il nous faut retenir que les conditions de minéralisation optimum (humidité, température) n'étant pas favorables au début du cycle de végétation, les disponibilités en S risquent d'être insuffisantes pour les plantes se développant rapidement au printemps (colza - trèfle - luzerne).

b) Migration : Il faut mentionner que l'anion  $SO_4$  ne peut être retenu directement par le complexe argilo-humique de charges négatives. Le rôle intermédiaire du calcium permet une fixation variable qui atteindrait 50 kg à l'hectare en fonction du degré de saturation du sol. KEILLING (1960) pense que les ions sulfates sont retenus par les hydroxydes de fer sous forme d'essaims d'ions "

Les sulfates se comporteront donc dans les sols d'une façon générale, comme les nitrates, avec possibilité de migration par lessivage ou par remontée capillaire. Notons que généralement, l'anion  $SO_4$  entraîne une décalcification par entraînement de  $CaSO_4$  dans les cas de pluie ; l'intensité de l'acidification qui en résultera, dépend de la nature du cation (maximum avec les ions ammonium), et l'inverse, l'absorption du soufre à partir de  $CaSO_4$  par les végétaux libère du Ca susceptible de se fixer au complexe absorbant.

L'analyse des eaux de drainage fait apparaître une perte annuelle moyenne de 30 à 80 kg par hectare et par an ; il s'agit de la plus forte perte observée avec celle de N, après celle du calcium. Cependant, ces pertes ne sont pas distribuées régulièrement au cours de l'année, la répartition sous la dépendance du régime des pluies accuse un maximum en automne se traduisant après un hiver pluvieux par un fort déficit au printemps.

## CHAPITRE VII : DIAGNOSTIC DES BESOINS EN SOUFRE

### I - SYMPTOMES DE CARENCE

Les symptômes visuels de carence s'apparentent étroitement à ceux de la carence en N avec lesquels ils peuvent être facilement confondus. On constate un vieillissement prématuré ; les feuilles deviennent vert pâle. Le jaunissement paraît moins net que pour la carence en N, mais les feuilles les plus âgées prennent une couleur " tabac " puis meurent.

### II - ANALYSE FOLIAIRE

Après attaque de l'échantillon sec par l'acide nitrique et calcination, on élimine l'excès de  $\text{NO}_3\text{H}$  avant de précipiter les ions  $\text{SO}_4$  sous forme de  $\text{SO}_4\text{Ba}$ .

### III - ANALYSE DANS LE SOL

- Dosage total par formation de sulfates alcalins transformés en  $\text{SO}_4\text{Ba}$
- Dosage gravimétrique, BERTRAND ( 1927)
- Dosage colorimétrique ( acidechloranilique)
- CHESNIN et YEN (1951) proposent une méthode de dosage par turbidimétrie du soufre assimilable après extraction par des réactifs doux ( réactif de MORGAN -  $\text{ClH } 0,001 \text{ N-}$ ).

Il est encore prématuré de définir par ces méthodes des critères relatifs au niveau d'alimentation en S des plantes.

## PRINCIPES DE LA FUMURE

### I - APPORTS

Soit sous forme de composés présents dans les engrais ou de soufre élémentaire, l'industrie des engrais minéraux s'orientant vers la fabrication d'engrais concentrés exempts de sulfate, peut tenir pour certain qu'il en résultera une déficience en soufre des cultures, à plus ou moins long terme

VII<sup>ème</sup> - P A R T I E

LES O L I G O - E L E M E N T S

---

CHAPITRE I	-	LE FER
CHAPITRE II	-	LE MANGANESE
CHAPITRE III	-	LE CUIVRE
CHAPITRE IV	-	LE ZINC
CHAPITRE V	-	LE BORE
CHAPITRE VI	-	LE MOLYBDENE
CHAPITRE VII	-	LE CHLORE
CHAPITRE VIII		LE COBALT

## LES O L I G O - E L E M E N T S

Différentes substances ne sont absorbées qu'à très faible dose par les plantes d'où leur nom " oligo-éléments ". En effet, les prélèvements effectués par les végétaux se chiffrent par dizaines ou centaines de grammes par hectare.

TENEUR des PLANTES CULTIVEES EN OLIGO-ELEMENTS PAR MILLION DE MATIERE SECHE ( TROCME - 1960 )

Plantes	Mn	Cu	Zn	B	Mo	
Céréales .....	grain	30-80	4-8	20-50	2,5- 7	0,4
	paille	25-70	3-5	40	1- 8	
Pommes de terre(tubercules)	5	6	8-16	8-15		
Betteraves .....	racines	10	8	15		
	feuilles	40	3	35		
Légumineuses de prairies	50	10	20	20-50	0,7 -3	
Graminées de prairies	75-100	5-10	20	10	0,5 -3	

Généralement, les sols sont mieux pourvus d'éléments-traces que d'éléments majeurs, relativement aux besoins des plantes, ainsi que le montre le tableau ci-dessous

TENEUR DES SOLS en ELEMENTS MAJEURS et ELEMENTS TRACES

	ELEMENTS MAJEURS						ELEMENTS TRACES					
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Mo
o/oo Matière sèche des plantes	20	10	2	20	5	20	0,10	0,03	0,03	0,02	0,005	0,002
o/oo de Sol	1	1	1	5 <sup>(2)</sup>	5 <sup>(2)</sup>	15 <sup>(1)</sup>	20	0,6	0,1	0,04	0,02	0,01
Rapport	20	10	2	4	1	1,3	0,005	0,03	0,3	0,5	0,25	0,2

(1) - Inerte en grande partie

(2) - Sols non calcaires

Plus faible est le rapport d'un nombre de la première ligne du tableau au nombre correspondant de la deuxième ligne, plus élevées sont les réserves du sol par rapport aux besoins des plantes. On constate, malgré toutes les critiques que l'on peut présenter à ce tableau ( il ne tient pas compte notamment de l'assimilabilité des éléments du sol), que les éléments majeurs se différencient nettement des éléments-tracés. Ceci explique dans une certaine mesure que les carences en éléments traces soient plus rares que les carences en éléments majeurs.

Il apparaît que le problème de la restitution des prélèvements des cultures ne se pose pas du tout de la même façon pour les éléments-traces et les éléments majeurs, l'épuisement des sols par les cultures étant beaucoup moins intense pour les premiers que pour les seconds. L'absorption de ces oligo-éléments en quantité insuffisante provoque les maladies de carences dont le diagnostic est souvent délicat; car il existe des carences absolues ou primaires et des carences conditionnées. A l'inverse, l'excès d'oligo-éléments entraîne souvent un effet de toxicité.

CHAPITRE I : L E F E R

I - FER et PLANTE

a) - Rôle : si le fer n'est pas un constituant de la chlorophylle, il est indispensable à sa formation ; la carence en fer donne lieu à la disparition de cette chlorophylle et comme conséquence, apparition de la chlorose. De plus, le fer entre dans la constitution d'un grand nombre d'enzymes d'oxydation : flavoprotéines, protéines, cytochromes, peroxydase, catalase.

b) - Besoins des plantes : Le fer est, parmi les oligo-éléments celui que les plantes renferment en plus grande quantité. On trouvera ci-dessous un ordre de grandeur de la teneur en fer des plantes cultivées ( TROCME - 1960) :

Plantes	Par million de matière sèche
Céréales ..... Grain	50
..... Paille	125
Pommes de terre (tubercules)	40
Betteraves ..... racines	100
..... feuilles	150
Légumineuses de prairie	100
Graminées de prairie .....	75
Feuilles d'arbres fruitiers	100
Fruits : 4 par million de matière fraîche	



c)- Forme libre et insoluble : hydrate ferrique et formes cristallines. La dégradation de structure, la destruction des complexes argilo-humiques floculés libèrent les hydrates de fer colloïdaux : le sol prend une couleur vive, ocre-rouille. Cette forme colloïdale peut évoluer, soit vers une forme cristalline (formation de concrétions), soit au contraire vers une forme pseudo-soluble si le fer est "complexé" par la matière organique soluble.

Cet oxyde de fer peut alors former un "film" autour des particules plus grossières et les souder entre elles : c'est l'origine des "concrétions" en général durcies (CAILLERE et HENIN, 1951). Suivant la nature du minéral ainsi formé et son degré d'hydratation, le sol offre une couleur caractéristique. Si le micro-climat du sol est humide, on trouve de la stilpnosidérite ( $Fe_2O_3 \cdot 2H_2O$ ), de couleur ocre. La goethite, forme peu hydratée, offre une couleur intermédiaire brun-rouge. Enfin, l'hématite, l'oligiste sont rouges. Les concrétions de couleur noire contiennent généralement du manganèse associé au fer.

d)- Formes pseudo-solubles complexées : Certains agents "peptisants" solubles, silice et matière organique, forment avec le fer des complexes pseudosolubles qui empêchent sa précipitation, en milieu aéré et à pH supérieur à 4, alors que normalement elle devrait intervenir dans ces conditions. En milieu pauvre en matière organique et peu acide, il se forme des complexes ferro et ferrisiliciques. En milieu riche en matière organique soluble et acide, il se forme des complexes fer-organique (BETREMIEUX, 1951).

Tous ces complexes pseudo-solubles, aussi bien les complexes minéraux que les complexes organiques sont électronégatifs, ils sont dispersés, même en milieu neutre ou légèrement alcalin et ils restent stables en présence de calcaire.

On peut donc affirmer qu'en présence de calcaire actif, le fer reste pratiquement insoluble.

e)- Evolution du fer dans les sols : la formation des complexes pseudo-solubles de fer est favorisée par l'acidité, le caractère réducteur du milieu et l'abondance d'éléments complexants, tels que la matière organique soluble (GREENE, 1963).

La précipitation du fer, ainsi solubilisé, peut intervenir sous l'action de différentes causes, qui agissent le plus souvent en combinaison ; élévation du pH, abondance de l'ion calcium dans les solutions du sol :  $(CO_3H)_2Ca$ , aération du milieu provoquant l'oxydation du fer ferreux. D'autre part, la dessiccation du sol qui intervient en période sèche et chaude favorise la précipitation du fer : en milieu acide les phénomènes d'oxydation et de dessiccation suffisent très souvent à provoquer la précipitation du fer et son évolution sous forme cristalline : c'est l'origine de la formation des concrétions et des cuirasses.

### III - DIAGNOSTIC DU MANQUE DE FER

a) Analyses : L'analyse reflète difficilement le besoin en fer des végétaux ; le fer soluble correspond au fer ferreux, mais comme les milieux réducteurs empêchent la vie des racines, c'est de toute façon à partir du fer ferrique qu'elles s'alimentent. Donc normalement les racines ne peuvent s'alimenter en fer que si elles le dissolvent elles-mêmes par leurs excréments,

à moins que le fer ne soit combiné à des composés minéraux (silice) ou organiques (chélates ou autres) à molécules relativement petites susceptibles de diffuser vers les racines.

Le fer dit libre des sols, c'est-à-dire celui qui n'est plus engagé dans des minéraux primaires et qui s'est déposé à l'état d'enduits minces à la surface des particules minérales ou qui a flocculé avec des composés humiques, est probablement la partie la plus accessible à l'action des racines ou des corps susceptibles de former avec le fer des composés pseudo-solubles.

b) - Symptômes de carence : Les symptômes de carence en fer sont dans la plupart des cas, appelés communément chlorose, encore qu'il existe beaucoup de chloroses ne relevant pas d'une carence ferrique. Ils consistent essentiellement en une décoloration du limbe, qui prend un aspect chlorotique, les nervures pouvant se détacher en vert sur le limbe jaune clair. Ce sont les feuilles les plus jeunes qui sont atteintes en premier lieu. Dans les cas graves, apparaissent des nécroses irrégulièrement réparties dans le limbe, puis les feuilles atteintes tombent prématurément.

#### IV - CAUSES des CHLORUSES

Ces carences sont sous la dépendance de trois causes principales, susceptibles d'ailleurs d'agir simultanément :

- La chlorose qui se manifeste en terrain calcaire, dite chlorose induite par le calcaire. C'est la plus fréquente. Elle n'affecte cependant qu'un petit nombre d'espèces végétales non adaptées :

- les arbres fruitiers, surtout le poirier sur cognassier, et le pêcher sur franc,
- le fraisier,
- la vigne,
- le rosier,
- quelques plantes annuelles, notamment le lupin jaune.

TROCME (1960) pense que cette chlorose correspondrait à une insolubilisation du fer à cause de la présence de carbonate de calcium ; plus généralement, c'est la réaction alcaline du milieu qui entraverait la mobilisation d'hydroxydes ferriques. Le calcaire a une action d'autant plus marquée qu'il est susceptible de se dissoudre plus rapidement dans les solutions du sol. La détermination du calcaire dit actif permet d'apprécier cette vitesse de dissolution et de connaître ainsi le pouvoir chlorosant d'un terrain donné.

Cependant, en sol calcaire, on assisterait à une utilisation du fer par les plantes par :

- contact direct avec les racines ;
- présence d'une grande quantité de  $\text{CO}_2$  laquelle abaisserait la valeur du pH ;
- excrétion par les racines de substances ayant des propriétés de chélates.

Les espèces chlorosantes seraient capables de prélever du fer en sol calcaire, mais le fer serait rendu insoluble à l'intérieur des plantes et ne participerait plus à leur métabolisme. On a montré notamment que la chlorose due au calcaire s'accompagne d'une modification de la distribution du fer à l'intérieur des plantes, modification que la présence de calcaire ne provoque pas chez les plantes non sensibles à la chlorose. Des études de CARLES et al. (1963) confirmeront cette hypothèse en affirmant que la répartition des éléments paraît primordiale par rapport à leur abondance et que le pétiole aurait un certain rôle dans leur répartition.

De toute façon, les facteurs qui augmentent la dispersabilité du fer dans le milieu calcaire (acidification du milieu notamment) favorisent l'absorption du fer et seraient de nature à diminuer la chlorose.

Les chloroses dues à l'excès d'un élément autre que le fer (antagonisme) par exemple, le cuivre, le cobalt,

Les chloroses dues à l'insuffisance d'un autre élément, exemple le potassium ; l'absorption de K s'accompagnerait d'une augmentation d'acidité favorisant la mobilisation du Fe.

Ces deux derniers types de chlorose sont susceptibles de se manifester en terrains de réactions diverses, même sur des plantes ne souffrant pas de chlorose en terrain calcaire.

A l'inverse il est très rare de constater une toxicité due au fer.

## V - TRAITEMENT

Diverses possibilités, mais toutes également imparfaites, sont offertes pour traiter la chlorose :

- mettre du fer assimilable à la disposition des plantes ;
- rendre plus assimilable (ou utilisable) le fer préexistant dans les sols ou dans les plantes ;
- rendre moins assimilables les éléments se comportant comme des antagonistes du fer, ou provoquer une action inverse sur les éléments se comportant comme synergiques du fer; (synergie signifie "coefficence", c'est-à-dire renforcement mutuel de deux causes indépendantes).

### a) Apport de fer assimilable :

- sulfate ferreux : cette méthode est peu efficace, car il se produit une insolubilisation très rapide ;
- d'après TROCME (1960) des chélates de fer absorbés par les racines et assez résistants aux attaques des micro-organismes éviteraient la chlorose s'ils sont disposés dans le sol au niveau des racines. Le sel éthylène diamine de l'acide o-hydroxyphénylacétique très stable dans le sol permettrait de lutter pendant quelques années contre la chlorose. Les pulvérisations foliaires des chélates ont donné de très bons résultats.

### b) Mobilisation du fer dans le sol :

- soit par acidification du sol,
- soit par apport de matière organique avec formation de complexes ferro ou ferri-organiques.

En résumé, au point de vue pratique, il est préférable de tenir compte du taux de calcaire actif du sol, avant la plantation de plantes sélectionnées et résistantes au calcaire.

## CHAPITRE II : LE MANGANESE

### I - MANGANESE ET PLANTE

On considère que le manganèse est indispensable pour l'activité maxima de divers enzymes, notamment de décarboxylation et déshydrogénation, qu'il catalyse la réduction des nitrates, et qu'il active en outre un grand nombre de systèmes enzymatiques. Des antagonismes très caractérisés entre fer et manganèse ont été signalés par divers auteurs, mais cette question reste encore controversée. <sup>Parmi</sup> Les espèces les plus sensibles citons : l'avoine, le blé, l'orge, les betteraves, les pommes de terre.

### II - MANGANESE ET SOL

a) Différentes formes : Le chimisme du manganèse dans le sol est loin d'être connu de façon satisfaisante. Les difficultés de cette étude proviennent, pour une large part du fait que cet élément possède plusieurs états d'oxydation et se rencontre dans le sol sous les formes suivantes :

- à l'état d'ion manganoux,  $Mn^{++}$ , échangeable, donc assimilable ;
- à l'état bi, tri, ou tétravalent, sous forme d'oxydes, anhydres ou hydratés, pouvant former des concrétions ou être finement répartis.
- sous forme de sels peu solubles : phosphates, silicates, carbonates ( dans les sols riches en calcaires);
- en liaison organique. Certains auteurs ont considéré que le Mn bivalent pourrait être sous forme de complexe organique inassimilable. A vrai dire, ces formes sont très mal connues à l'heure actuelle. Quoi qu'il en soit, le manganèse est peu assimilable dans les sols riches en humus.

Sans entrer dans le détail, on peut faire encore les remarques suivantes :

1)- L'oxydation du Mn bivalent se fait rapidement à partir de  $pH > 5,5$  et surtout de  $pH 6,2$  à  $7,8$ , par voie biologique essentiellement. A l'inverse, la réduction des formes oxydées, par voie chimique ou biologique, se fait plus facilement à des  $pH$  bas, mais à tout  $pH$  si la tension d'oxygène est assez faible. En l'absence de conditions anaérobies, la forme Mn bivalente, assimilable, se rencontre donc surtout en sols acides. Dans les sols neutres ou calcaires, cette forme tend à disparaître;

2)- Les oxydes supérieurs ( manganiques) sont plus ou moins facilement réductibles. Différentes techniques de laboratoire permettent d'apprécier la fraction dite active ou réductible de ces oxydes.

b) Evolution : Outre les sols très pauvres en Manganèse , toutes les conditions qui favorisent la carence en manganèse sont les suivantes : sols de  $pH$  relativement élevés (  $\leq 6,5$ ) et surtout sols acides dont le  $pH$  a été relevé par apport d'amendements calcaires et riches en matière organique, plus exactement en vieil humus. Il'humidité exagérée du terrain favorise l'apparition des carences, encore que ce point ne soit pas très clair, étant donné que

les conditions asphyxiantes (anaérobies) facilitent en principe le passage du manganèse à des formes réduites assimilables. Les irrigations au moyen d'eaux chargées en matières organiques et en calcaire, favorisent également l'apparition de carences, en raison, d'une part du lessivage du manganèse préexistant, réduit par les matières organiques, et d'autre part de l'enrobage des particules d'argile par les matières organiques et le calcaire, rendant le manganèse restant, peu accessible à l'action des agents réducteurs et dissolvants.

Les risques d'apparition de carence de Mn par apport d'amendements calcaires à des sols de limon ne semblent pas assez graves pour faire renoncer au mariage si celui-ci améliore nettement leur structure, et il serait possible de remédier à la carence éventuelle de Mn par pulvérisations de sels manganéux au moment d'autres traitements pesticides ou herbicides.

### III - DIAGNOSTIC du MANQUE de MANGANESE

a) Analyse : En fait les méthodes d'extraction employées extraient non seulement du Mn échangeable éventuellement présent, mais aussi d'autres formes, telles que du Mn facilement réductible. Ces techniques ne sont cependant pas d'application générale et ne doivent être utilisées qu'avec prudence, l'interprétation des résultats ne devant s'effectuer qu'en fonction des conditions locales.

#### b) Symptômes des carences

Les symptômes généraux consistent en chloroses internerviaires des feuilles, plus diffuses que les chloroses " ferriques ". Ces symptômes présentent des caractéristiques variables avec les espèces. Chez les céréales, et plus spécialement chez l'avoine, particulièrement sensible, la chlorose est accompagnée de tâches décolorées longitudinales, les feuilles atteintes se cassent à angle aigu, la plante perd sa turgescence et prend un port affaissé caractéristique. Chez les arbres fruitiers, les symptômes peuvent ressembler aux premiers symptômes de carence magnésienne. Ils affectent également, en premier lieu, les feuilles les plus âgées.

### IV - PRINCIPES DE LA FUMURE

WOLF et CHAUTARD ( 1964 ) indiquent pour les cultures de maïs une augmentation de 196% pour une dose optimum apportée sous forme de pulvérisations foliaires de  $MnSO_4$ .

## CHAPITRE III - : LE CUIVRE

### I - CUIVRE et PLANTES

Le cuivre a été reconnu comme constituant de divers enzymes d'oxydation : polyphénoloxydase, tyrosinase, laccase, acide ascorbique oxydase. Il accroît la résistance à certaines maladies cryptogamiques. Chez les plantes, il apparaît comme un élément migrateur se portant là où l'activité vitale est la plus grande.

### II - CUIVRE et SOL

Les teneurs varient de 1 à 100 parties par million suivant les sols. trois facteurs principaux interviennent dans l'alimentation en cuivre des plantes dans les conditions naturelles :

- a) - La teneur en cuivre d'un sol est toujours étroitement liée à celle de la roche-mère. Certaines roches éruptives acides -(granites, granulites) sont pauvres en cet élément, ce qui explique les carences de cuivre observées en Bretagne.
- b) - L'élévation du pH diminue l'assimilabilité du cuivre, et des carences en cuivre ont été observées en terrains calcaires. A l'inverse, en sol léger acide, le lessivage du cuivre peut entraîner des carences.
- c) - Le cuivre est énergiquement fixé par la matière organique des sols, et des carences en cuivre s'observent en sols riches en vieil humus.

### III - DIAGNOSTIC DES BESOINS EN CUIVRE

a) - Analyse : Aucun réactif d'extraction n'est considéré actuellement comme satisfaisant pour la détermination du cuivre assimilable. Le dosage du cuivre total donne dans certains cas des indications sur les possibilités de carence. COPPENET et CALVEZ (1956) préconisent l'emploi de la méthode au 2-2' biquinolyl ; d'après DUVAL (1963) le seuil de carence pour les sols granitiques de Bretagne se situe à 7-8 mg de Cu par Kg.

Certaines expériences en Allemagne, comme en France, tentent à montrer que la pigmentation des conidies d'Aspergillus Niger permettrait de déceler la teneur au milieu, donc du sol en Cuivre,

b) - Symptômes de carence : D'une façon générale, la chlorose est un des symptômes de carence, mais elle est accompagnée de beaucoup d'autres manifestations, variables avec les espèces. Par exemple, en se limitant aux espèces les plus sensibles. Chez les céréales, on constate une décoloration jusqu'à teinte blanche de la pointe des plus jeunes feuilles avec flétrissement du feuillage.

Chez les arbres fruitiers, on remarque des nécroses marginales des feuilles (comme dans les carences de potasse) et défeuillaison à partir de l'extrémité des pousses.

#### IV - APPORTS

Les apports de cuivre au sol sous diverses formes (sulfate, acétate, certains oxydes) donnent en général des résultats satisfaisants sur plantes annuelles. Des doses moyennes, de l'ordre de 50 kg de sulfate de cuivre par ha pour les premières applications, ont permis d'enregistrer des résultats spectaculaires. Quelle que soit la forme d'application le cuivre est très peu mobile dans le sol (sauf en sol léger), donc les applications au sol sont insuffisantes pour les plantes à racines profondes (arbres fruitiers) et l'on a alors recours à des pulvérisations sur le feuillage ou sur le bois.

L'effet résiduel des produits incorporés dans le sol est assez marqué (de l'ordre de plusieurs années). Il est possible qu'après quelques applications de cet ordre, échelonnées sur une période de 10 ans environ, il devienne inutile ou même dangereux de continuer les apports, lesquels entraîneraient une toxicité marquée (cas des vieilles vignes).

### CHAPITRE IV : LE ZINC

#### I - ZINC et PLANTE

Le zinc fait partie de l'anhydrase carbonique, enzyme catalysant la décomposition de l'acide carbonique en anhydride carbonique et eau. Il entre sans doute également dans la composition de divers enzymes d'oxydation. On considère aussi que le zinc empêcherait la destruction d'auxines, ce qui expliquerait le raccourcissement des entre-nœuds observé chez les plantes carencées en zinc. A noter que la luminosité favoriserait la carence en zinc, vraisemblablement par une activité différente des auxines.

#### II - ZINC et SOL

On trouve dans les sols de 0,05 à 0,01 o/oo de zinc en général, et des extrêmes de 0,01 à 1 o/oo. Les minéraux renfermant du zinc sont assez facilement décomposés, et le zinc libéré est vraisemblablement adsorbé sous forme de cation divalent ou d'ion complexe monovalent.

Les carences ont été observées sur des sols de types très divers, avec des pH variant de 4 à 8, et notamment :

- sols acides lessivés pauvres en zinc ;
- sols ayant reçu des chaulages excessifs ;
- sols légers calcaires riches en acide phosphorique (condition

fréquente d'apparition en France, dans la moyenne vallée de la Loire en particulier) ;

- sols alcalins riches en matière organique, par suite d'un phénomène de fixation mal connu ou de phénomènes microbiologiques. Inversement en arboriculture, l'engazonnement ou les engrais verts sont susceptibles dans certains cas, d'améliorer la nutrition en zinc des arbres, sans doute parce que les plantes de couverture absorberaient des formes de zinc inassimilables par les arbres et les restitueraient par la suite sous forme plus assimilable.

Notons que la luminosité favorise l'apparition de carences zinciques.

### III - SYMPTOMES DE CARENCE

C'est sur arbres fruitiers que les carences sont le plus fréquemment observées : feuilles petites (elles n'ont parfois que quelques mm de long) - plages chlorotiques sur les limbes - raccourcissement des entre-nœuds provoquant la formation de rosettes au lieu de rameaux qui s'allongent. La vigne et surtout le trépane sont également sensibles à la carence.

Chez les plantes annuelles, le raccourcissement des entre-nœuds provoque le nanisme des plantes carencées, dont les feuilles restent petites et souvent déformées.

Plantes sensibles : le lin (carences sporadiques en France), le haricot, le maïs, le houblon. Les céréales autres que le maïs sont peu sensibles.

### IV - TRAITEMENT DES CARENCES

Les applications de sels de zinc au sol risquent d'être inefficaces en sols neutres ou alcalins ; d'autre part le zinc est très peu mobile dans le sol et parvient difficilement à la portée des racines profondes. C'est pourquoi on préconise encore d'une façon générale les pulvérisations. Sur arbres fruitiers à pépins les pulvérisations de sulfate de zinc à 5 % (ou d'oxyde, ou d'oxysulfate), effectuées en fin d'hiver, sont en général efficaces l'année même du traitement. On peut également effectuer des pulvérisations plus diluées en cours de végétation.

L'emploi régulier des fongicides renfermant du zinc doit suffir à écarter les risques de carence en cet élément. Le superphosphate et le sulfate de  $\text{NH}_4$  apportent de petites quantités de zinc.

## CHAPITRE V - : LE B O R E

### I - BORE et PLANTE

Le bore intervient :

- dans l'absorption et le métabolisme des cations, et notamment du calcium;
- dans la formation de la pectine des membranes cellulaires ;
- dans la régulation de l'absorption de l'eau ;
- dans le métabolisme des glucides ( oxydation des sucres)

Il joue également un rôle sur la fécondation de certaines espèces végétales ( vigne). Notons que les monocotylédons sont généralement moins riches en bore que les dycotylédons, surtout les légumineuses, crucifères et amillifères.

### II - BORE et SOL

On trouve dans les sols de 0,003 à 0,1 o/oo de bore, le plus souvent de 0,01 à 0,025. Le bore présent sous forme de tourmaline ( borosilicate d'aluminium), dans les roches éruptives et métamorphiques est de peu de valeur pour les plantes. Les formes dérivées de sédiments marins ou liées à la matière organique sont plus facilement assimilables.

La détermination du bore extractible à l'eau chaude est susceptible de donner des indications valables sur les disponibilités des sols en bore assimilable par les plantes. Mais les faits expérimentaux manquent encore pour une utilisation sûre de ces données.

Des carences en bore s'observent sur des sols de pH très divers. En culture betteravière, d'après des observations faites en Belgique, c'est au voisinage de la neutralité que les manifestations de carence seraient les plus fréquentes.

pH ( eau)	Pourcentage des cas de carence	
	Terres limo- neuses	Terres sablo- limoneuses
6,0	0	5,5
6,1 - 6,5	5	16,1
6,6 - 7,0	13,6	25,4
7,1 - 7,5	28,0	42,5
7,6 - 8,0	35,2	9,5
8,0	18,2	1,0

Il ne faudrait pas cependant en conclure qu'il y a intérêt à marnier les sols neutres pour favoriser l'alimentation des plantes en bore. En outre, certains sols acides très lessivés sont très pauvres, en bore ; cas de certains sols de vignobles des Pyrénées-Orientales. Les chaulages ( ou marnages) font apparaître ou aggravent en général les symptômes de carence en bore.

La diminution de l'assimilabilité du bore par la sécheresse est un phénomène encore mal expliqué.

### III - LES CARENCES EN BORE

Les symptômes sont très divers suivant les espèces. D'une façon générale, ce sont les parties les plus jeunes, en croissance, qui sont les plus atteintes. La mort du bourgeon terminal, suivie d'un départ de bourgeons axillaires peut donner aux plantes un aspect buissonneux. L'apparition des carences en bore est liée davantage à la nature des plantes cultivées qu'à la nature du sol.

Les plantes les plus sensibles sont les choux-fleurs, les betteraves ( pourriture du coeur), les légumineuses fourragères ("jaune" de la luzerne), les pommes de terre, le céleri ( tige craquée), la vigne, les arbres fruitiers ( taches liégeuses dans le fruit et troubles de végétation) Par contre les céréales sont peu sensibles.

### IV - TRAITEMENT DES CARENCES

Les doses toxiques sont souvent de peu supérieures aux doses utiles et les applications de borax ne doivent être effectuées qu'avec prudence, d'autant plus que la sensibilité aux excès est très variable avec la nature des cultures. Les applications répétées de borax en culture betteravière peuvent accroître peu à peu le pouvoir alimentaire du sol, mais ne présentent pas , dans les conditions actuelles, un caractère dangereux

On a proposé récemment des produits moins solubles que le borax, notamment les verres frittés aux borosilicates qui risqueraient moins d'être toxiques, tout en ayant une action plus soutenue. De tels produits ont été encore peu expérimentés jusqu'à présent ; les premiers résultats signalés semblent encourageants.

## CHAPITRE VI - : LE MOLYBDENE

### I - MOLYBDENE ET PLANTE

Le molybdène joue un rôle important dans le métabolisme de l'azote. Il ferait partie de la réductase du nitrate, et sa carence provoque une accumulation de nitrates dans les plantes ( ce qui n'est d'ailleurs pas spécifique de la carence en molybdène) et une diminution de la teneur en acides aminés. Il est probable qu'il joue un rôle dans la synthèse de l'acide ascorbique et dans le métabolisme des substances pectiques. Le molybdène apparaît également comme essentiel pour les bactéries fixatrices d'azote. Les plantes les plus sensibles appartiennent à la famille des légumineuses et des crucifères ; certaines variétés comme le trèfle fixeraient de grandes quantités de molybdène ce qui entraînerait des risques de maladies sur le bétail.

### II - MOLYBDENE et SDL.

On trouve dans le sol de 0,1 à 5 parties de Mo par million en moyenne. Des teneurs élevées ( 200 ppm) ont été trouvées dans certaines roches sédimentaires argileuses.

L'assimilabilité du molybdène, contrairement à celle des autres oligoéléments, croît avec le pH, en sorte que le chaulage des terres acides augmente considérablement les quantités de molybdène à la disposition des plantes. La présence de matière organique facilite également l'absorption du molybdène par les plantes, et peut contrebalancer l'influence de l'acidité. La richesse du milieu en acide phosphorique est également un caractère considéré comme augmentant l'assimilabilité du molybdène.

Divers réactifs d'extraction ont été proposés pour l'estimation du molybdène assimilable, certains ( acide acétique, oxalate acide, etc...) semblent fournir de bonnes corrélations avec les observations faites sur le terrain, dans les pays où les carences en molybdène sont relativement fréquentes ( Nouvelle-Zélande, Australie, Ecosse).

### III - CARENCES en MOLYBDENE

Les plantes cultivées les plus sensibles sont : les brassicées ( chou-fleur, chou de Bruxelles notamment), les plantes de prairies ( légumineuses, ray-grass), le pois, l'avoine, l'épinard, la tomate, la laitue, les citrus. Un caractère assez général est la moucheture chlorotique des feuilles et l'apparition de chloroses marginales. Chez le chou-fleur, les limbes sont à peine formés, laissant nues les grosses nervures médianes, avec dépérissement du bourgeon terminal.

#### IV - TRAITEMENT DES CARENCES

Deux possibilités de traitement sont offertes : le relèvement du pH ou l'application de molybdène à des doses de l'ordre du Kg de molybdène au maximum ( molybdate d'ammonium par exemple), accompagnée, le cas échéant, d'une fumure phosphatée. Le deuxième traitement est parfois plus recommandable, les chaulages énergiques risquant de provoquer des carences en d'autres oligo-éléments ( notamment dans le cas de prairies, des carences en cobalt sur le bétail).

Le molybdène en excès dans l'alimentation animale provoque des troubles graves. De tels excès ont été observés en terres naturellement riches en molybdène, terres dérivées du lias inférieur notamment, ou à la suite d'applications inconsidérées de molybdates sur prairies, ne fût-ce que de quelques kilos.

---

#### CHAPITRE VII - : LE CHLORE

La nécessité du chlore pour les végétaux a été établie grâce aux cultures sur milieu artificiel. La carence en chlore provoque des chloroses et des nécroses, le flétrissement de la pointe des feuilles, et dans les cas graves, empêche la plante de fructifier. Cette carence est exceptionnelle dans les conditions naturelles ; en effet, les précipitations apportent au sol des quantités de chlore variant, suivant l'éloignement de la mer, de 5 à 500kg par ha et par an environ, et sont presque toujours suffisantes pour assurer les besoins des cultures. De plus beaucoup d'engrais chimiques ou de pesticides contiennent du chlore.

---

#### CHAPITRE VIII - : LE COBALT

Il n' a pas été prouvé jusqu'à présent que le cobalt soit nécessaire aux plantes, mais on sait qu'il est indispensable aux animaux, et à ce titre les conditions de l'alimentation des cultures en cet élément méritent d'être étudiées. De plus, le cobalt jouerait un rôle essentiel dans la fixation symbiotique de l'azote par les légumineuses.

La teneur en cobalt du sol varie de 0,001 à 0,1 o/oo. Les sols dérivés de roches acides ( granites, rhyolites) et de nombreuses roches sableuses sont en général pauvres, alors que les sols dérivés de roches alcalines ou de sédiments argileux sont beaucoup plus riches. Des carences ont également été observées en terrains calcaires. L'assimilabilité est plus élevée en milieu acide qu'au voisinage de la neutralité.

On suppose que le cobalt assimilable par les plantes se trouve sous forme adsorbée par le complexe argilo-humique, mais les normes ne sont pas encore définies avec précision.

La carence en cobalt intervient surtout sur la santé des animaux et principalement des bovins et ovins ( Nouvelle-Zélande-Australie), mais il suffit d'un apport de 2 à 3 kg de sulfate de cobalt à l'hectare pour éviter les troubles physiologiques.

## PRINCIPAUX PRODUCTEURS EUROPEENS D'ENGRAIS

### C.E.E. élargie

#### 1. FRANCE : Les six principales Sociétés Françaises :

1°) La COMPAGNIE FRANCAISE de l'AZOTE (COFAZ) résulte de la fusion des activités d'engrais de la Compagnie Française de Raffinage de Pierrefitte et d'Auby ( cette dernière ayant renoncé au rapprochement tenté pendant quelques mois avec la Société Chimique des Charbonnages). Elle fournit environ le quart du marché français.

Productions : Azote,  $P_2O_5$ , Complexes, Liquides.

2°) La SOCIETE GENERALE des ENGRAIS (GESA), société commune fondée par Péchiney-Saint-Gobain et Ugine-Kuhlmann pour la fabrication et la commercialisation de leurs engrais. Elle approvisionne environ le cinquième du marché français.

Depuis le 1/1/72, c'est la filiale commune à 50 % de Rhône Progil ( Groupe Rhône Poulenc) et de Produits Chimiques Ugine Kuhlmann ( Groupe Péchiney-Ugine-Kuhlmann).

Productions : Azote,  $P_2O_5$ , Complexes, Liquides.

3°) L'ENTREPRISE MINIERE et CHIMIQUE, la plus importante société chimique d'Etat dans ce secteur, a deux filiales : Les Mines de Potasse d'Alsace et de l'Azote et Produits Chimiques ( A.P.C.) issue de la fusion de l'ancien Office National de l'Azote - ONIA - avec la Société Potasse et Engrais Chimiques ( P.E.C.). Elle faisait encore récemment près de 90 % de son chiffre d'affaires en engrais. Elle essaie de se diversifier dans la chimie, d'une part, et de rationaliser l'exploitation des mines de potasse, d'autre part. Son chiffre d'affaires consolidé est voisin de 2 milliards de francs.

Productions : Potasse, Azote, Complexes, Liquides

4°) C.D.F. CHIMIE, Société Chimique des charbonnages, seconde entreprise chimique d'Etat, fait environ 45 % de son chiffre d'affaires consolidé en engrais, soit environ 600 millions de francs sur 1,3 milliard de francs. Elle a fait d'importants investissements dans ce secteur, mais elle souhaite développer d'autres activités, petro-chimiques qui réduiraient cette activité au tiers dans un chiffre d'affaires doublé en cinq ans.

Productions : Azote, Complexes, Liquides.

5°) LA SOCIETE GARDINIER, entreprise d'origine familiale, fait un chiffre d'affaires de l'ordre de 450 millions de francs et vend environ 10 % des engrais français. Elle est la propriété à 66 % de la famille Gardinier et pour le reste des coopératives agricoles. Par ailleurs, elle a notamment obtenu la participation de la Compagnie du Nord, holding du groupe Rothschild, dans ses investissements à Gardiloire, près de Saint-Nazaire.

Productions : Azote surtout transformateur, Complexes à Gardiloire.

6°) La SOCIETE CHIMIQUE de la GRANDE-PAROISSE, filiale à 56,5 % de l'Air Liquide et à 24,4 % des Charbonnages de France. Son chiffre d'affaires a été de 158 millions de francs en 1969. C'est la seule société française d'engrais qui soit cotée à la Bourse Spécialisée surtout dans les engrais azotés, elle maintient ses bénéfices à un niveau modeste au prix de fortes économies de gestion. Elle représente 7 à 8 % du marché français.

Productions : Azote, Complexes.

*7x Scores Thomas.*

2 - C.E.E.

A. ALLEMAGNE

- Groupe B A S F Wintershal : Potasse + Complexes
- Groupe FARWERKE HOECHST AG : Complexes
- Ruhr Stickstoff AG ( Bochum ) : Azote
- Ruhr Chimie AG ( Oberhausen).

B. BELGIQUE

- PRAYON S.A. : Acide phosphorique, liquides
- S.B.A. : Azote, complexes
- U.C.B-FIZONS : Azote, complexes, acide phosphorique
- CARBOCHIMIQUE DU TERTRE : Azote, acide phosphorique, complexes.
- .B.A.S.F. : Azote, complexes.
- TESSENDERLOO : potasse, phosphate bicalcique.
- LE RUPEL à MALINE : acide phosphorique
- ASED : Azote et complexes.

C. HOLLANDE

- U.K.F. ( DSM + Albatros ) : Azote , complexes, acide phosphorique.
- WIND-MILL à W Lardinggen ( CRC, New-York ) : acide phosphorique, complexes.
- ZUID CHIMIE ( Céh. Engrais ) : Acide phosphorique, complexes.
- C.N.A. : Azote, complexes.

D. ITALIE

- S E I F A (Montedison) : Azote, potasse, complexes.

E. GRANDE-BRETAGNE

- FIZONS : Azote, complexes
- ALBRIGHT WILSON, : acide phosphorique
- SHELL : Azote, complexes ( en rénovation )
- I C I : Azote, acide phosphorique, complexes.

.....

F. NORVEGE

- NORSK-HYDRO : Azote, complexes, acide phosphorique.

G. DANNEMARK

- L A D S SF : acide phosphorique

H. IRLANDE

- GRASSLAND FERTILISER à DUBLIN : Transformateur

- ALBATROS à NEW ROSS : Acide phosphorique

- GOULDING : Acide phosphorique

- N.E.T. : Azote

## LES MATIERES PREMIERES de l'INDUSTRIE des ENGRAIS

Les engrais chimiques s'utilisent en quantités relativement importantes, de l'ordre de 500 kg à 1 tonne à l'hectare. Ils font appel à des matières premières souvent moins concentrées. Il s'agit donc d'une industrie mettant en oeuvre des moyens de manutention importants et de grandes quantités de matières premières.

### 1°) Matières premières de l'industrie de l'azote et des engrais azotés : air, hydrogène, ammoniac.

Le produit de base est l'ammoniac.

Les matières premières sont donc l'azote qui provient en général de l'air, et l'hydrogène. Quelquefois, l'ammoniac lui-même est récupéré comme produit fatal d'une autre fabrication industrielle (industrie du caprolactame de B A S F à Anvers, industrie de la houille, autres industries).

Autrefois, l'hydrogène provenait surtout du charbon mais dans les usines modernes, il provient maintenant soit du gaz naturel, soit de produits pétroliers (naphta).

La matière de base produite, l'ammoniac a l'avantage d'être très concentrée (82 % N) et fluide (liquide ou gaz) et ainsi de se prêter commodément à des manipulations industrielles. Il peut être utilisé directement comme un engrais en injection dans le sol. Le plus souvent, il sert soit d'intermédiaire, soit à la fabrication d'autres intermédiaires dans l'industrie des engrais (acide nitrique, nitrate d'ammoniac, phosphate d'ammoniac, etc.). Le schéma ci-joint donne une image simplifiée de l'industrie des engrais azotés.

### 2°) Matières premières de l'industrie de l'acide phosphorique et des engrais phosphatés - Phosphates, minerais soufrés.

#### A - LES PHOSPHATES

Le phosphore est un élément très largement répandu dans le monde. Les gisements de minerais phosphatés se répartissent en deux grands groupes suivant leur origine géologique : ignée ou sédimentaire.

- Origine ignée - Ce sont des roches qui contiennent jusqu'à 37 % de  $P_2O_5$ . On les rencontre dans les terrains très anciens en couches atteignant plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. Ces gisements résultent d'intrusion du magma dans des roches cristallines qui ont donné naissance à des veines ou filons.

Le phosphore est lié au calcium et au phosphore sous forme de fluorapatite :  $Ca_{10}(PO_4)_6F_2$  qui cristallise dans le système hexagonal.

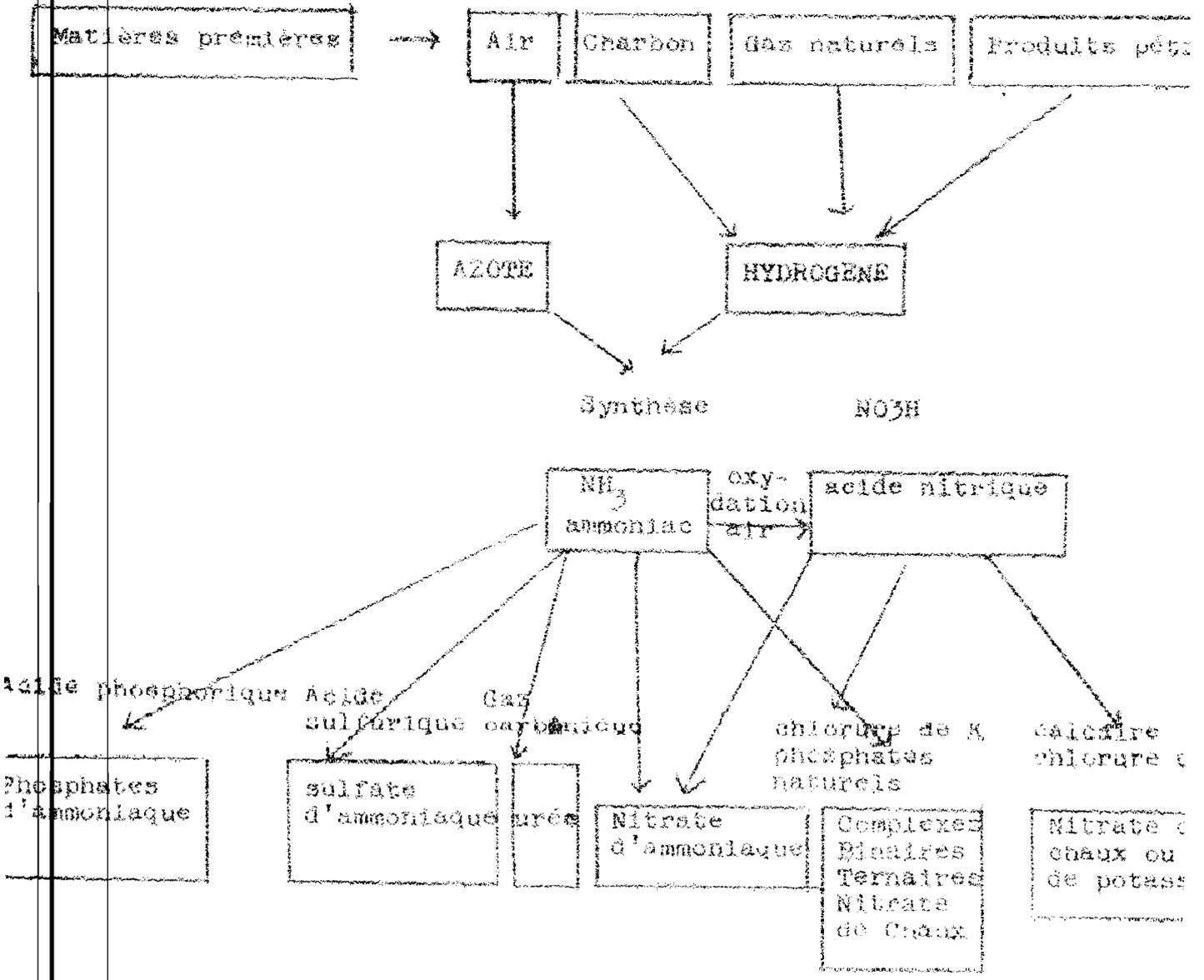
Principaux gisements : Péninsule de Kola (U R S S), Ouganda, Transvaal.

Le traitement industriel des apatites d'origine ignée présente plus de difficultés que celui des apatites d'origine sédimentaire.

- Origine sédimentaire - Cette catégorie fournit 85 % de la production mondiale. Elle est très répandue et se rencontre dans tous les étages géologiques. La formation des minerais de phosphates sédimentaires est disputée.

Gisements : Ils sont très nombreux : Afrique, U.S.A. Asie, Océanie.

SCHEMA SIMPLIFIE de la FABRICATON des ENGRAIS AZOTES



- Origines diverses

- . Défection d'oiseaux ( Océanie, pays tropicaux, phosphates du Quercy).
- . Minerais de fer phosphoreux ( la minette lorraine contient 1 % de phosphore).

a) La Minette Lorraine : Elle est une matière première de la sidérurgie. Les scories de déphosphoration de ce minerai pour la fabrication de la fonte et de l'acier constituent des engrais de bonne qualité mais qui ont les défauts de leurs qualités ; riches en produits secondaires, ils sont peu concentrés en acide phosphorique ( 16 à 20 %). Par ailleurs, la concurrence pour la sidérurgie, de minerais de fer plus purs et plus faciles à traiter, peut être une menace pour l'approvisionnement de l'agriculture en ce type d'engrais dans les années à venir.

b) Les phosphates alumino-calciques ( Thiès, Australie, etc...) minerais de l'industrie des engrais auxquels s'intéresse également l'industrie de l'aluminium, permettent d'obtenir des engrais phosphatés de concentration moyenne ( 32 - 34 % de  $P_2O_5$ ) après traitement des minerais par voie thermique. Le produit obtenu est commercialisé sous le nom de phospal. Il sert surtout de matière première pour la fabrication d'engrais composés et d'aliment du bétail.

c) Les phosphates tricalciques ( A.F. N, U.S.A., Australie, etc... ) Ce sont les minerais les plus utilisés dans l'industrie mondiale des engrais. Ils servent de matière première à différents engrais phosphatés ou composés.

- Traités par la chaleur ( calcination, puis broyés) ils donnent naissance à un engrais utilisé dans divers pays ( Belgique, Allemagne, Hollande).
- Traités par des acides forts ( acide sulfurique, acide nitrique, acide phosphorique) utilisés seuls ou en mélange, ils sont la matière première par excellence des engrais phosphatés.
- Enfin, ils peuvent être utilisés comme engrais après broyage surtout lorsqu'ils sont tendres en sols suffisamment acides.

d) Les Os : Les phosphates d'os sont une source de moins en moins importante d'acide phosphorique.

B - LES MINÉRAIS SOUFRES

a) Le soufre natif

Rassemblé en gisements à plus ou moins haute teneur, le soufre natif se trouve dans les régions volcaniques actuelles ou anciennes. Les minerais sont des mélanges de soufre, de terre marneuse, de gypse, de calcaire et de bitume. Les principaux gisements se trouvent aux U.S.A. ( Louisiane et Texas) et au Mexique, en Italie et au Japon ; au Chili, en Argentine et en Espagne, il y en a aussi mais de moindre importance. En France, il existe quelques gisements de faible teneur à Apt ( Vaucluse), Camoins (Bouches du Rhône) et Malveys-Narbonne (Aude).

b) Les roches sulfatées

Elles apparaissent essentiellement dans les dépôts sédimentaires. Il en existe plusieurs types. Le plus important est le gypse :  $SO_4Ca$ ,  $2H_2O$ . Elles ne sont pratiquement pas utilisées par l'industrie des engrais.

c) Les sulfures métalliques

Ils constituent des gisements de pyrites ( Sulfure de fer), de blendes ( sulfure de zinc), de chalcosine ( sulfure de cuivre), de galène ( sulfure de plomb ).

Les pyrites sont avant tout considérées comme une source de soufre, tandis que le soufre est un sous-produit dans la blende et la chalcosine traitées par la métallurgie. D'importants gisements de pyrites existent aux U.S.A. sur le pourtour du Bassin Méditerranéen ( Espagne, Italie, Chypre,) au Portugal, au Japon, en Scandinavie ( Suède, Norvège) et en Allemagne. En France, on exploite encore quelques mines, à Saint-Bel (Rhône) et Chizeuil (Saône et Loire).

Des gisements de blendes sont exploités en Allemagne ( Silésie) U.S.A., Espagne, Maroc, Australie et Nouvelle Zélande.

d) L'hydrogène sulfuré

Certains pétroles et gaz naturels contiennent du soufre en quantité notable généralement sous forme de  $SH_2$  provenant semble-t'il de la réduction du gypse par les carbures d'hydrogène. On l'extrait par des traitements chimiques de raffinage, soit sous forme élémentaire, soit sous forme d'acide sulfurique. C'est du soufre de récupération et d'épuration.

Depuis quelques années, l'exploitation en France, par des techniques appropriées des gaz naturels du Sud-Ouest à Lacq, très chargés en  $SH_2$  (15 %) donne lieu à une importante production de soufre. Des disponibilités<sup>2</sup> considérables en cet élément sont ainsi apparues en France.

Au Canada, ont été découverts également d'importants gisements de gaz à forte teneur en hydrogène sulfuré.

Industrie du soufre

- Le soufre brut s'obtient à partir du soufre natif ou de l'hydrogène sulfuré. Les techniques de raffinage au soufre brut conduisent à la production de plusieurs quantités de soufre agricole :

- Le soufre sublimé ou fleur de soufre,
- Le soufre trituré et le soufre ventilé,
- Le soufre micronisé et le soufre dispersé,
- Le soufre mouillable et le soufre colloïdal

- L'anhydride sulfureux  $SO_2$  résulte de la combustion du soufre brut soit directement, soit dans un courant d'air après fusion. On l'obtient aussi par le grillage des pyrites et des blendes dans des fours dont il existe de nombreux types ( four à axe vertical, four tubulaire rotatif, four à fluidisation, four à grillage rapide du procédé " Flash roasting ").

- C'est l'acide sulfurique qui revêt le plus d'importance car il est à l'origine de nombreuses fabrications. Il se forme par oxydation du  $SO_2$  et hydratation ultérieure, soit par le vieux procédé des chambres de plomb<sup>2</sup> ( de moins en moins), soit par le procédé de contact ( qui tend de plus en plus à se substituer au précédent). Les usages de l'acide sulfurique sont innombrables, les plus importants concernant la fabrication des engrais chimiques et de nombreux produits utilisés en agriculture :

- Engrais azotés
- Engrais phosphatés

Par attaque des phosphates naturels tricalciques, insolubles dans l'eau, on obtient selon le cas :

- Les superphosphates de chaux simples.
- L'acide phosphorique en poussant plus loin la réaction. Cet acide permet d'obtenir de nombreux engrais phosphatés simples ou composés :

- Les superphosphates concentrés,
- Les phosphates d'ammoniaque,
- Les engrais complexes binaires ou ternaires,
- Les engrais liquides phosphatés.

- Des engrais potassiques

Le sulfate de potasse résulte du traitement du chlorure de potasse par  $\text{SO}_4\text{H}_2$ .

- Des engrais complexes, utilisé seul ou en association avec d'autres acides ( attaque sulfo-nitrique, attaque sulfo-phosphorique).

- Divers autres produits utiles à l'agriculture ou à l'industrie.

- sulfates,
- esters phosphoriques,
- fumigènes, explosifs, etc...

### 3°) Les matières premières de la potasse et des engrais potassiques.

Les engrais potassiques utilisés en agriculture sont extraits directement des mines. Ce sont donc pour la plus grande part des minerais plus ou moins purifiés.

Les minerais sont extraits de bassins sédimentaires dont les réserves mondiales sont très importantes. De nombreux pays possèdent sur leur territoire des mines de potasse. Citons les principaux minerais : aux Etats-Unis d'Amérique, au Canada, en Espagne, en France, en Allemagne, en Italie, en Pologne, en Russie, au Congo, en Israël. Les gisements d'Allemagne sont parmi les plus grands du monde. Ceux d'Alsace sont en perte de vitesse si bien que dans l'avenir, la potasse consommée en France risque d'être en grande partie importée.

#### Processus de fabrication

##### A - Procédé thermique de dissolution

Les sels bruts sont moulus dans des concasseurs géants et dissous dans une eau mère très chaude. La solution saturée s'écoule dans les décanteurs où les résidus se déposent et sont éliminés. Le chlorure de potassium contenu dans l'eau mère est précipité par refroidissement dans des appareils à vide. La saumure est amenée dans des centrifugeuses ou sur des filtres à tambour où les cristaux de sel sont séparés de l'eau mère qui retourne dans le cycle de fabrication. Le sel est ensuite séché dans des fours rotatifs.

##### B - Procédé de flottation

Dans le cas du procédé de flottation, il importe de broyer finement au préalable le sel brut pour le diviser déjà en bonne partie en  $\text{KCl}$  et  $\text{NaCl}$ . Un triage sur grilles tamis permet de renvoyer au broyeur tous les grains de sel d'un calibre trop fort tandis que le sel déjà réduit à l'état de poudre - mélangé à un réactif de flottation - parvient dans les cellules de flottation. En l'occurrence, l'eau mère ne sert plus d'agent de dissolution, mais uniquement de moyen de transport. Les particules de chlorure de potassium, enveloppées par le mouillant, sont entraînées par les bulles d'air qui s'y sont fixées à

la surface des cellules d'où ils sont enlevés sous forme d'écume. Les cristaux de KCl sont ensuite essorés et séchés comme au cours du procédé thermique de dissolution.

### C.) Fabrication du sulfate de potasse

Il s'obtient par attaque du chlorure de potasse par l'acide sulfurique. Il peut également s'obtenir par d'autres procédés.

## LES DIFFERENTS ENGRAIS COMMERCIALISES

### 1. LES ENGRAIS AZOTÉS

#### A) - Les engrais organiques

Ce sont des produits qui ont une action lente et progressive. On les utilise comme engrais de fond.

1°) Déchets industriels - Leur teneur en azote varie selon l'origine de la matière organique :

Tourteaux	: 4 à 7 % d'azote organique,
Sang desséché	: 10 à 13 % d'azote organique,
Corne torréfiée	: 13 à 15 % " "
Viande desséchée	: 9 à 11 % " "
Cuir torréfiés	: 7 à 9 % " "
Déchets de laine	: 3 à 9 % " "
Déchets de poisson	: 4 à 10 % " "

Ces produits sont utilisés seuls soit traités par l'acide sulfurique (Fabricants d'engrais organo-minéraux) avec addition d'acide phosphorique et de potasse pour en faire des engrais contenant les trois éléments fertilisants.

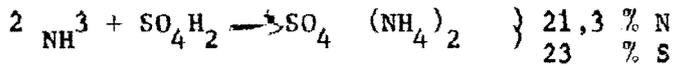
2°) Produits de synthèse - L'industrie fabrique aussi des engrais organiques de synthèse libérant lentement leur azote dans le sol. L'industrie étudie de nombreux produits parmi lesquels on peut citer :

- Les produits obtenus par action de l'urée sur la formaldéhyde.
- Les produits obtenus par réaction entre l'urée et la crotonaldéhyde.

Ces engrais se présentent sous forme de poudre, soit sous forme de granulés plus ou moins anguleux.

B) - Les autres engrais azotés

1°) Sulfate d'ammoniaque - Produit fatal de l'industrie du caprolactame (intermédiaire de la fabrication de textiles artificiels) et de diverses autres industries, distillation de la houille, ainsi que produit pur pour l'industrie des engrais :



Produit cristallisé.

2°) Cyanamide calcique en voie de disparition.

3°) Urée - Synthèse directe à partir de l' $\text{NH}_3$  et du  $\text{CO}_2$ .  
46 % perles : prilling.

4°) Solutions azotées - (liquides clairs).

Dissolution en mélange de nitrate d'ammoniaque et d'urée ou d'urée seule ( la solution de nitrate d'ammoniaque chaude fournit la chaleur de réaction pour la dissolution de l'urée).

5°)  $\text{NH}_3$  : 83 % N ; gaz utilisé en injection dans le sol.

6°) Ammonitrates : 20,5 %, 33,5 %, 34,5 %



Solutions chaudes  $\longrightarrow$  prilling ( granulés de 33,5 % et 34,5 % d'ammonitrates  
 $\longrightarrow$  granulés enrobés (20,5%) en diminution,

7°) Nitrate de chaux

Présentation : granulés en plaquettes

C) - Les engrais potassiques

Ils proviennent en quasi-totalité de gisements naturels ( en France : sel de potasse d'Alsace).

Le dosage s'exprime en oxyde de potassium  $\text{K}_2\text{O}$ .

On vend les produits suivants :

1°) Sylvinite 40 % de  $\text{K}_2\text{O}$

Elle est obtenue par enrichissement de la sylvinite brute en chlorure de potassium, avec élimination de la majeure partie du sel marin ou  $\text{ClNa}$  dont elle contient encore 30 %. Elle est en voie de disparition sur le marché français.

Présentation : Produit cristallisé.

2°) Le chlorure de potassium : 60 %  $\text{K}_2\text{O}$

C'est l'engrais potassique le plus courant. Il provient du raffinage de la sylvinite dont on élimine la presque totalité du chlorure de sodium. Il n'en reste que 3 %. Le produit peut être blanc ou rose ( traces d'oxyde de fer dans le cas de fabrication par flottation).

Présentation : Poudre cristallisée ; écailles, perles pour emploi dans les engrais liquides clairs ( plus grande pureté).

3°) Le sulfate de potasse : 50 % de  $K_2O$

Il est fabriqué par traitement du chlorure de potassium par l'acide sulfurique. Il dose 50 % de potasse et 18 % de soufre. Il ne contient pas de chlorure.

4°) Le patent kali : 28 %  $K_2O$

Mélange de sulfate de potasse et de sulfate de magnésie, il dose 28 %  $K_2O$  et 8 %  $MgO$ . C'est un produit importé d'Allemagne.

Présentation : Poudre cristallisée

5°) Le nitrate de potasse : 44 %  $K_2O$

Engrais azoté et potassique renfermant 13 % d'azote nitrique.

Présentation : poudre cristallisée.

6°) Engrais composés binaires et ternaires ( pour mémoire)

D) - Les engrais phosphatés

Ils sont très nombreux et peuvent être classés selon plusieurs critères.

a) Classification suivant leur solubilité

- Engrais phosphatés solubles ( superphosphates, phosphates d'ammoniaque solubles dans divers réactifs).
- Engrais phosphatés hyposolubles - ( phosphate bicalcique, scories, phosphal, phosphates thermiques).
- Engrais phosphatés insolubles ( phosphates de chaux naturels).

b) Classification suivant leur origine

On peut distinguer deux grandes origines pour l'ensemble des engrais phosphatés.

1°) L'industrie sidérurgique avec les scories de déphosphoration ou Scories Thomas, impuretés de la fabrication de l'acier.

2°) Les gisements de phosphates naturels :

Ces phosphates peuvent être traités de différentes façons et fournir ainsi des engrais variés.

- Traitement physique : Triage et broyage : Phosphates moulus.
- Traitement thermique : Calcination et broyage : phosphates calcinés, phosphal.
- Traitement chimique : Attaque des phosphates naturels par un ou plusieurs acides pour transformer totalement ou partiellement le phosphate tricalcique en bicalcique ou monocalcique.
  - . . Attaque sulfurique : superphosphate normal.
  - . . Attaque sulfo-phosphorique : superphosphate enrichi
  - . . Attaque phosphorique : superphosphate concentré ou triple.
  - . . Attaque nitrique, nitro-phosphorique ou sulfonitrique : nitrophosphates.
  - . . Attaque chlorhydrique : phosphate bicalcique.

- L'acide phosphorique  $PO_4H_3$  obtenu en poussant la réaction de l'attaque sulfurique des phosphates jusqu'au bout, est une matière première importante de l'industrie des engrais. Il sert à fabriquer :

les phosphates d'ammoniaque (mono et di ammonique) par neutralisation avec l'ammoniac).

L'acide superphosphorique par concentration.

L'élimination de l'eau donne lieu à la naissance d'acide pyrophosphorique, d'acide métaphosphorique et d'acide polyphosphorique en proportion variable selon la concentration. La neutralisation de cet acide par l'ammoniaque donne naissance aux polyphosphates d'ammoniaque, binaires de base de l'industrie des engrais liquides et des engrais en suspension.

### E) - Les différents engrais phosphatés

#### Les superphosphates de chaux

Les superphosphates minéraux ( par opposition aux super d'os d'origine organique devenus très rares) sont obtenus par attaque des phosphates naturels par les acides sulfurique et phosphorique. La quantité d'acide utilisée est dosée pour que la quasi-totalité du phosphate tricalcique soit transformée en phosphate monocalcique

a) Superphosphate normal : mélange de phosphate monocalcique et de sulfate de chaux.

Concentration 16-20 %  $P_2O_5$  soluble dans l'eau et le citrate d'ammoniaque dont 90 % au moins soluble dans l'eau.

Riche en soufre : 11-12 % et en calcium : équivalent de 28 % de son poids de CaO.

b) Superphosphate enrichi : Attaque des phosphate par un mélange d'acide phosphorique et sulfurique.

Concentration 25 à 32 % de  $P_2O_5$  soluble dans l'eau et le citrate d'ammoniaque. Contient 8 à 6 % de soufre.

c) Superphosphate concentré ou triple : Obtenu par attaque phosphorique uniquement. Concentration : 44 à 48 % de  $P_2O_5$  soluble dans l'eau et le citrate d'ammoniaque. Il ne contient pas de soufre, est utilisé comme matière première de l'industrie des engrais composés.

#### - Phosphate bicalcique ou précipité

attaque des phosphates naturels par ClH et neutralisation de la liqueur obtenue par CaO 38-42 %  $P_2O_5$  soluble dans le citrate d'ammoniaque. Peu utilisé.

#### - Phospal

Minerais de Thiès (Sénégal)

Calcination puis broyage ( four rotatif à 900°) 34 %  $P_2O_5$  dont 26 soluble citrate d'ammoniaque. Matière première de certains engrais composés et de binaires.

Phospal 32 humidifié → utilisation en nature

Présentation ; poudre

#### - Scories de déphosphoration ( Scories Thomas)

très dense 100 kg → 50 l.

14-22 %  $P_2O_5$  (16-19)

Phosphates et silicophosphates bi-calciques

Soluble dans le réactif de Wagner ( doit dissoudre 75 % du  $P_2O_5$  des scories

45-55 kg CaO totale ( 80 % chaux active)

oligo-éléments : 25-50 kg/ tonne de Mn et Mg

Cu, Co, Mo

40 % des E.P. en 66

Présentation : poudre ; des essais de granulation.

- Phosphates thermiques calcinés

Allemagne, Belgique, Hollande  
Calcination (+ silicate)

- Phosphates naturels moulus - tendres

Provenant d'A.F.N. 58-75 % phosphate de chaux.

le reste  $CO_3Ca$ ,  $F_2Ca$ , tendreté et finesse conditionnent la valeur.

minimum 90 % au tamis 100.

Il existe dans le commerce 90 % tamis 150

90 % tamis 300 jusqu'à 35 % de  $P_2O_5$  soluble.

Présentation : Poudre, granulés.

F) - Les engrais composés

Contiennent plusieurs éléments fertilisants essentiels N, P ou K.

Ils sont désignés par une formule : N - P - K

(N           %)

( $P_2O_5$        %)

( $K_2O$        %)

Ils se sont beaucoup développés en France durant ces dernières années :

64,2 % des éléments fertilisants utilisés en France

3 catégories

- mélanges

- complexes

- liquides

1°) Les engrais composés de mélange

2 ou 3 éléments, mélange mécanique

binaires ou ternaires - Formules très nombreuses en diminution.

Granulés ou pulvérulents

Bulk Blending : mélanges crac de granulés surtout utilisés aux U.S.A.

2°) Les engrais complexes ou de combinaison chimique

Sont en extension en France.

Il n'y a pas de définition du terme complexe si bien qu'il est difficile de faire la distinction entre ces engrais et les précédents.

Ils sont obtenus par voie de réaction chimique entre les matières premières de l'industrie des engrais :

- Phosphates naturels,

- Ammoniac,

- Acide nitrique,

- Acides phosphorique, sulfurique ou carbonique

- Sels de potasse, ETC.....

Il existe un grand nombre de procédés de fabrication des engrais complexes selon l'acide ou les mélanges d'acides que l'on utilise, selon les produits que l'on élimine et selon la phase de fabrication au cours de laquelle on introduit les différents composants.

Un grand nombre de complexes ont un produit de base commun : le phosphate d'ammoniaque.

Présentation : Pulvérulents ou le plus souvent

Granulés ( commodité d'emploi ).

(binaires, ternaires les plus nombreux).

### Tendance actuelle

- Granulation systématique
- Enrobage extérieur et de la masse pour éviter les " reprises " en masse.
- Concentration des formules de façon à diminuer les frais de production, transport et commercialisation à la tonne. L'inconvénient est de perdre certains éléments secondaires tels que Ca et S, mais comme la loi ne permet pas de les facturer, il est difficile d'aller à contre courant d'autant plus que ces éléments ne sont pas toujours indispensables. On spécialise cependant certaines formules à certaines cultures :

- présence de S pour le colza -
- absence de Cl ( $SO_4K_2$ ) pour certaines cultures : lin, vigne, arbres fruitiers, culture de primeurs, etc...

### Les-engrais composés liquides

- Binaires NP mélange sol. N + 14.48.0
- Ternaires NPK mélanges sol. N + 14.48.0 + KCl en solution  
absence de  $NO_3$  pour éviter  $NO_3K$  (cristallisation facile)  
inconvénient : faibles concentrations.
- Inconvénients : utilisent beaucoup de citernes
- Avantages : pas de mélange à la ferme; tous les avantages des liquides.

Suspension Problème de la potasse → basse concentration des liquides.

Principe : on favorise la formation d'un grand nombre de cristaux sur les colloïdes d'une argile à attapulgite.

Ils permettent ainsi des concentrations beaucoup plus élevées que les liquides ainsi que d'utiliser des formules riches en potasse.

3 méthodes :

- 1°) 1 solution de base 4,5-15-45 que l'on mélange aux produits liquides classiques sol. N et binaire de base dans un atelier de mélange local au moment de l'emploi.
- 2°) 1 solution binaire de base apportant l'attapulgite que l'on mélange à la solution N et dans laquelle on dissout de la potasse solide dans un atelier de mélange local au moment de l'emploi.
- 3°) On peut aussi faire au moment de l'emploi la formule d'engrais " à la demande " dans un atelier local.

### Les engrais organiques dissous

Ils sont fabriqués en attaquant par  $SO_3H_2$  des déchets organiques variés (résidus de tanneries) avec adjonction de phosphates naturels, ammoniac, urée, KCl, etc... pour neutraliser la masse. ON obtient des engrais ternaires de 15 à 25 % d'éléments fertilisants  $N + P_2O_5 + K_2O$ .

ETUDE CRITIQUE

d'une DOCUMENTATION CONCERNANT UN PRODUIT

UTILISE POUR AUGMENTER LA FERTILITE DES SOLS

---

## LE CYCOCEL

### SES PROPRIETES - SES APPLICATIONS

extrait de : Economie Agricole n° 6 - juin 1966

---

Le rôle des apports d'azote dans la croissance de la plante et dans le rendement en grains de celle-ci est maintenant parfaitement connu, Malheureusement, un facteur limitatif apparaît rapidement : la VERSE.

De nombreux chercheurs se sont penchés sur les causes et les moyens d'y remédier. Ce fut tout d'abord par l'adjonction fractionnée des quantités d'engrais azotés normalement utilisées.

Puis une solution très importante a été apportée à ce problème : la découverte d'espèces à port plus rigide ou de tiges plus courtes a permis d'augmenter considérablement les doses d'azote utilisées et par là même les rendements. Mais là encore la VERSE devenait le facteur limitatif.

Aujourd'hui après plusieurs années d'expérimentation, nous pouvons affirmer qu'un nouveau palier vient d'être franchi grâce au chlorure de chlorocholine ou CYCOCEL.

#### A. PROPRIETES PHYSIQUES et CHIMIQUES.

Le CYCOCEL à l'état pur se présente sous la forme d'une poudre cristalline très soluble dans l'eau. Il est commercialisé en France en solution dont la concentration est de 400 g de matière active par litre. Comme presque tous les régulateurs de croissance il a été d'abord utilisé pour lutter contre les plantes adventices; les Autrichiens LINSER, MAYR, KUHN et PRIMOST ont été les premiers à entreprendre une série d'études basées sur l'emploi du C.C.C. (Cycocel) sur le blé en liaison avec des doses d'azote plus élevées.

#### B. EPOQUES des TRAITEMENTS et DOSE D'APPLICATION.

Ces études ont tout d'abord permis de préciser les dates de traitement les plus favorables : en fin de tallage ou en début de montaison avec des doses d'application de 1,5 à 2 kg de matière active par hectare.

Grâce à sa solubilité dans l'eau, il est possible de l'épandre en même temps que les fongicides. D'ailleurs une série d'essais pratiques réalisés depuis 1963 dans des milieux naturellement infestés ont démontré que la combinaison CCC/Cianamide de chaux donnait d'assez bons résultats. Lesquels étaient d'ailleurs considérablement améliorés avec l'incorporation de produits à base de mercure.

#### C. MODES de TRAITEMENT

Pour les mêmes quantités de CCC utilisées, les raccourcissements de tiges sont moins importants lorsque l'application est faite en plein champs (15%) que lorsque celle-ci s'effectue en pulvérisation (20 à 25 %). Une nouvelle raison donc, pour le distribuer avec les fongicides ou les herbicides.

.....

LE CYCOCEL : REGULATEUR DE CROISSANCE DE LA PLANTE

Nous l'avons vu, le CYCOCEL a dépassé le stade : lutte contre les plantes adventices. Il est en effet utilisé maintenant comme régulateur de croissance de la plante elle-même.

Des essais effectués à Gembloux ont chiffré les raccourcissements moyens des tiges pour les différentes céréales. Nous obtenons :

- 20 % pour les blés d'hiver,
- 33 % pour les blés de printemps,
- 7 % pour les escourgeons,
- 4 % pour les orges,
- 2 % pour l'avoine.

Les plantes traitées au CCC présentent un aspect plus ramassé. Les tiges sont plus courtes et leur diamètre est plus grand. Dans 70 % des essais, on a également noté une croissance plus importante des racines. Les feuilles sont plus larges et de couleur plus foncée.

Le raccourcissement des tiges se manifeste, au niveau du premier entre-noeud, pour un traitement précoce.

Ainsi le nombre limité d'unités d'azote vient d'être reculé une nouvelle fois. Et par là même les rendements ont une nouvelle fois progressé.

AUGMENTATION des UNITES d'AZOTE - DONC AUGMENTATION DES RENDEMENTS

Grâce à l'action du CCC l'augmentation de l'apport d'azote au-delà de la fumure normale peut atteindre :

- 45 unités pour les blés d'hiver et les escourgeons,
- 30 unités pour les blés de printemps,
- 25 unités pour les orges.

Ces apports supplémentaires (azote/Cycocel) amènent des augmentations spectaculaires des rendements. MM. RIXHON et A. GROHAIN de l'Institut de Gembloux ont constaté des accroissements de rendements de :

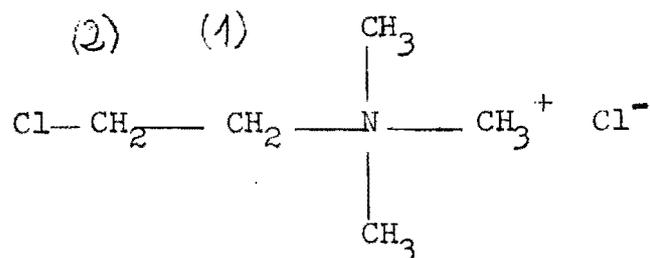
- pour les blés d'hiver ..... 20 %
- pour les blés de printemps ..... 7,5 %
- pour les escourgeons ..... 30 %
- pour l'orge ..... 1,5 %
- pour l'avoine ..... 1,0 %

## LE C.C.C.

Produit commercialisé sous le nom de Cycocel  
marque déposée par American Cyanamid.

### I - COMPOSITION

Le C.C.C. ou chlorure de 2 chloroéthyl  
triméthylammonium est un sel blanc très soluble  
dans l'eau et le méthanol.



On peut le trouver dans le commerce soit :

- . sous forme de poudre blanche à 65 % pour le traitement des semences,
- . sous forme de solutions aqueuses à 40 ou 50 %

C'est du reste sous cette dernière forme  
qu'on le rencontre le plus souvent.

### II - INFLUENCE DU C.C.C. sur la plante :

#### a) Sur le système racinaire

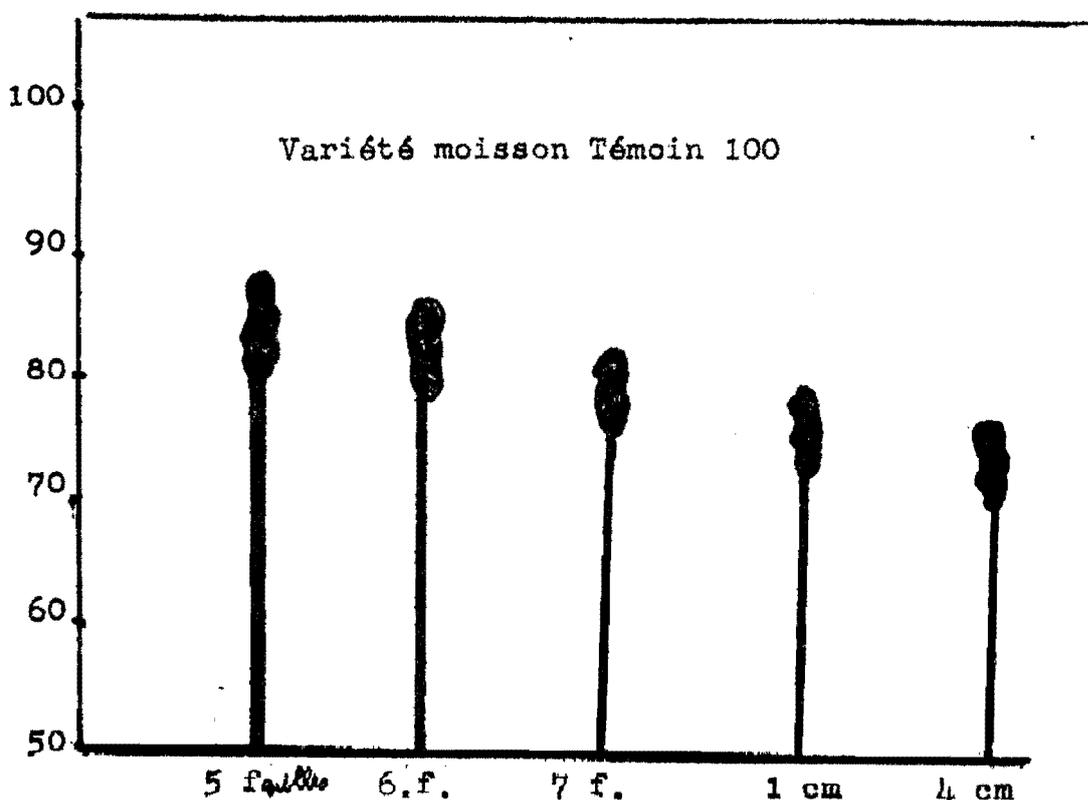
Peu d'études ont été entreprises à ce sujet  
à faibles doses le système racinaire ne semble pas  
être foncièrement modifié. Toutefois à des doses  
élevées par exemple 10 kgs/ha les racines des plantes  
traitées ont un diamètre plus grand que celles des  
témoins.

#### b) Sur la tige

Celle-ci est modifiée dans sa longueur et  
dans son épaisseur sous l'action du C.C.C. Mais la  
structure interne de la tige n'est pas modifiée.  
Seule la longueur moyenne des cellules l'est, elle  
passe par exemple de 0,5 mm à 0,3 mm.

Au point de vue de cette action du C.C.C. sur la tige, on peut dégager deux faits :

1. Action du C.C.C. sur la longueur de la paille en fonction des époques d'intervention

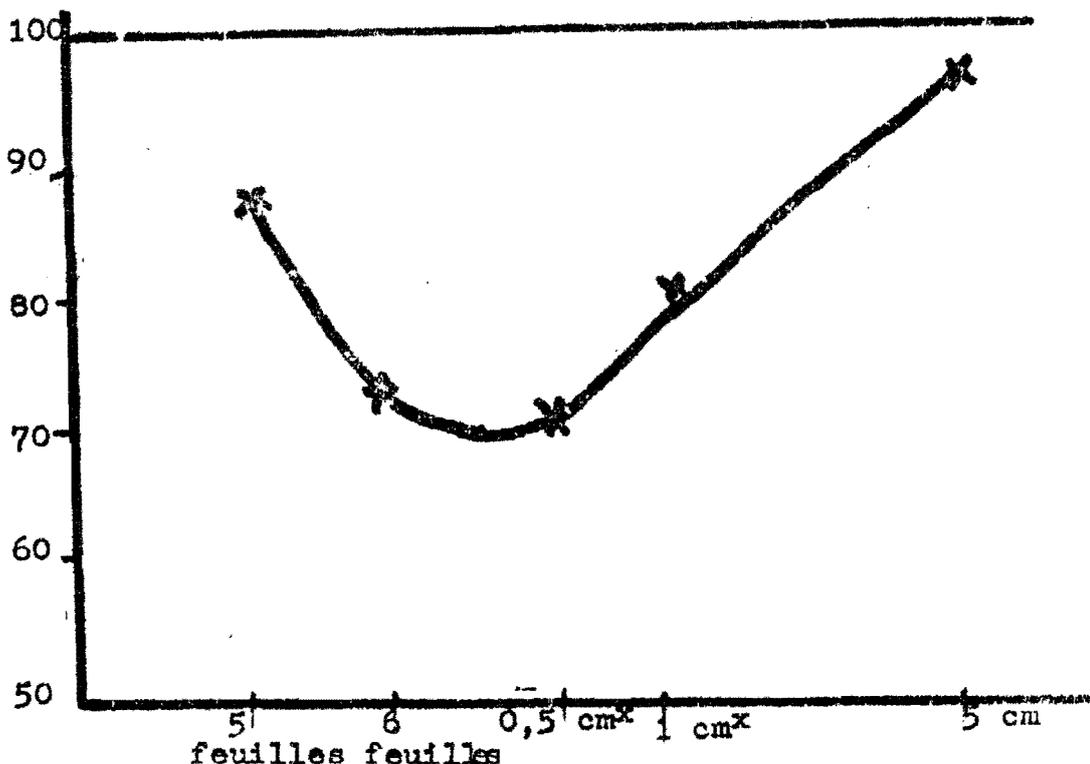


Le graphique ci-dessus indique que pour la variété du blé "moisson", le raccourcissement sera de plus de 20 % pour le traitement le plus tardif alors qu'il ne sera que de 12 % pour le traitement le plus précoce.

A première vue, il semblerait nécessaire de traiter le plus tardivement possible. Mais le raccourcissement selon l'époque du traitement n'affecte pas la même région de la tige

2. Variation de la longueur du premier entre-noeud en fonction de la date de traitements.

Hauteur par rapport au témoin



cm : x hauteur de l'épi par rapport au plateau de tallage dans le maître-brin

Ce graphique montre que le raccourcissement maximum du premier entre-noeud est obtenu lorsque le traitement est appliqué sur les plantules au stade 6 à 7 feuilles, ce qui représente près de 2 semaines. Pour éviter la verse, il est indiscutable que plus le premier entre-noeud sera court et donc robuste plus la tige sera résistante à la verse physiologique et au piétin. On peut donc conseiller de traiter les blés entre le stade 6 feuilles et le début de montaison (épi de 0,5 cm du plateau de tallage).

c) Action du C.C.C. sur les feuilles

. Il a été observé que les blés traités ont au début de la végétation un port plus dressé et que le feuillage présente une coloration plus foncée par augmentation de la teneur en chlorophylle.

D'autre part, l'épiderme des feuilles traitées comptent d'avantage de stomates par unité de surface. De plus, les feuilles des plantes traitées sont en général moins longues et plus larges que chez les témoins comme le montre le tableau suivant :

Variétés	Longueur	Largeur
Cappelle	96	101
Etoile de Choixy	86	117
Petit quinquin	93	107
Bidi 17	87	121

Dimensions des feuilles de blés traités à la dose de 2,26 kgs/ha - Témoin 100

d) Action du C.C.C. sur l'épi

L'épi, lui non plus, ne subit pas de modification morphologique notable. L'épi traité présente le même nombre d'épillets que celui du témoin ; néanmoins, il a été constaté que le nombre d'épillets stéril, était parfois moins élevé chez les plantes traitées que chez les témoins.

A titre indicatif, on peut donner les résultats suivants :

NOMBRE D'EPILLETES STERILES

Variétés	C.C.C. 2,26 kg/ha	Témoins
Cappelle	{ 4,4 5,3 2,4	{ 4,9 5,3 4
Etoile de Choixy	{ 1,7 0,8	{ 2,4 1,1
Petit quinquin	1,6	1,7
Bidi 17	1,8	2,1
Champlein	2,2	2
Prestige	2,1	2,7

e) Poids de 1000 grains et C.C.C.

Le poids moyen des grains est en général peu affecté par le C.C.C. Il semblerait qu'avec le C.C.C. une légère augmentation du poids de 1000 grains puisse être enregistrée mais c'est avec prudence qu'il faille l'envisager.

III - INFLUENCE DU C.C.C. SUR LE RENDEMENT

On remarque que tous les traitements mettant en oeuvre le C.C.C. donnent des rendements ayant une tendance assez nette à être supérieure au témoin ; là encore néanmoins il faut être prudent. L'augmentation de rendement peut certainement s'expliquer partiellement par la réduction du nombre des épillets stériles. Cette augmentation de rendement peut être également rapprochée de l'augmentation de la vitalité des blés traités laquelle comme nous l'avons vu se traduit par un plus grand développement des feuilles à couleur plus verte.

Il semble d'après les derniers résultats des champs d'essais que le C.C.C. ne permette pas l'emploi d'une augmentation nette d'azote.

Il est certain que dans les régions où l'on emploie que peu d'azote (ex 50 unités) le C.C.C. pourra permettre l'épandage de 50 unités supplémentaires ; En revanche, dans les régions où 100 unités sont normalement utilisées on ne peut préconiser qu'une très légère augmentation de la quantité d'azote à apporter.

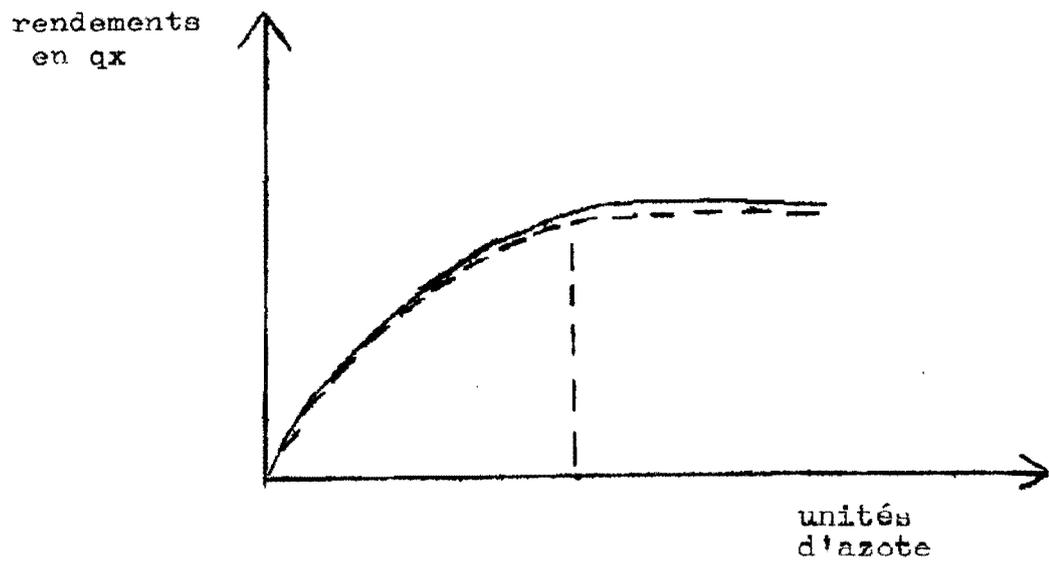
IV - UTILISATION

- La dose courante est de 4 à 5 litres de produits à l'hectare, produit qui contient entre 40 et 50 % de matière active à l'hectare soit 1,6 à 2,5 Kgs de matière active à l'hectare.
- Quant à la toxicité du produit elle est très faible les résidus du C.C.C. appliqué dans les conditions normales sont très faibles et tendent vers zéro.

CONCLUSIONS

Des résultats des champs d'essais effectués ces dernières années on peut en déduire les courbes suivantes :

— avec C.C.C.  
- - - sans C.C.C.



## CCC et doses d'azote

Le CCC (chlorure de chlorocholine) est un régulateur de croissance qui a pour effet de réduire la taille des blés et, ce faisant, de diminuer la verse. Comme les fortes doses d'azote peuvent entraîner la verse certaines années, le S.P.I.E.A. a entrepris depuis 1966 l'étude des relations CCC - azote.

L'étude a porté sur 196 essais dont 43 pour l'année 1968. 190 essais comportaient 4 doses d'azote, chacune avec ou sans CCC. 29 d'entre eux comportaient en outre une étude de dates d'apport de l'azote.

Le CCC a été apporté à la dose de 4 litres par hectare (c'est-à-dire 1,6 kg de matière active) à l'aide d'un appareil de pulvérisation à dos au propane. La date d'apport du CCC s'est située à la fin du tallage ou au tout début de la montaison.

### Action du CCC sur les rendements

Les écarts moyens de rendements entre les parcelles avec CCC et les parcelles sans CCC (toutes doses d'azote) sont les suivants :

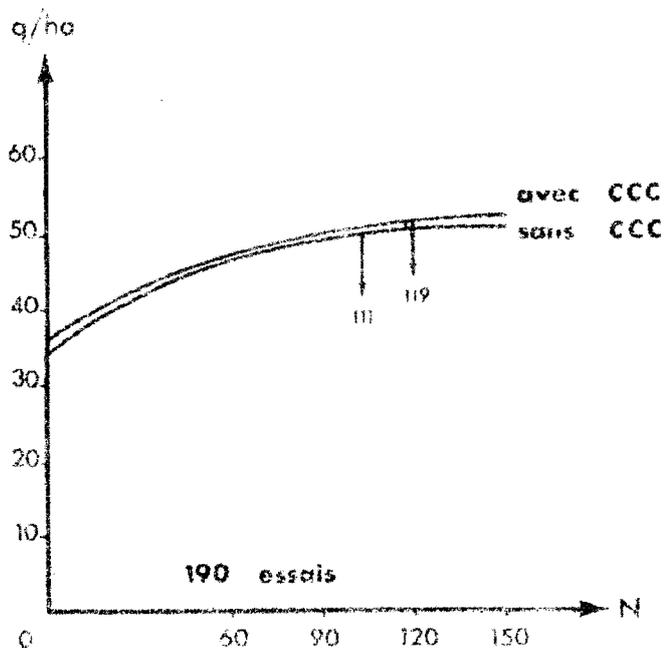
1966	0,6 q/ha en faveur du CCC
1967	1,7
1968	0,1
moyenne	0,8

Si l'on considère non plus les écarts moyens mais l'effet du CCC à la dose de 120 unités on obtient les écarts suivants :

1966	0,7 q/ha en faveur du CCC
1967	2,6
1968	0,3
moyenne	1,2

Dans l'un et l'autre cas l'accroissement de rendement provoqué par le CCC est insuffisant pour que le CCC soit rentable en moyenne, puisque le coût du CCC est d'environ 2 quintaux par hectare. L'action du CCC n'a été rentable qu'en 1967. Elle a été la plus faible en 1968.

Le graphique ci-dessous résume l'ensemble de ces résultats :



Si on mesure l'action du CCC non plus dans l'ensemble des essais, mais uniquement dans ceux où il y a eu au moins une parcelle versée, on obtient des résultats différents. A la dose de 120 unités d'azote l'écart moyen en faveur du CCC pour l'ensemble des 3 années est de 3,1 q/ha. Le CCC est alors rentable.

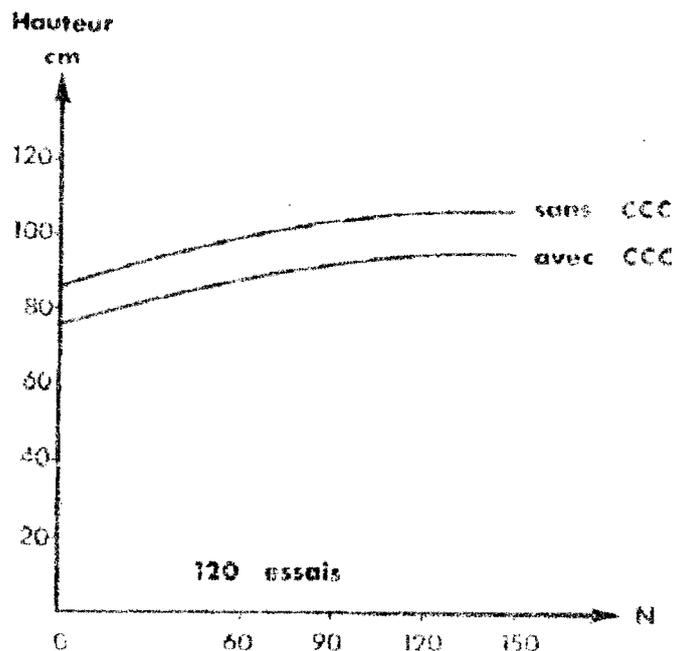
En définitive on peut recommander d'utiliser le CCC lorsqu'il y a une présomption suffisante de verse. Ce peut être le cas dans les sols riches en azote (derrière un précédent légumineuse par exemple), avec un peuplement élevé à la sortie de l'hiver. Dans les situations versantes on pourra ainsi se permettre d'augmenter les doses d'azote avec beaucoup moins de risques. D'une manière plus générale on peut d'ailleurs affirmer que l'intérêt du CCC paraît très limité avec des doses d'azote faibles ou même modérées.

Action du CCC sur les composantes du rendement et le poids spécifique

Le CCC n'a aucune action sur le nombre d'épis par m<sup>2</sup>. Par contre il diminue légèrement le poids des 1000 grains. Cette diminution a été sensible en 1966 (1,5 à 2 grammes en moins) sans doute par suite d'une utilisation un peu trop tardive du CCC. En 1967 et 1968 cette diminution a été plus faible : 0,5 à 1 gramme.

L'action du CCC sur le poids spécifique est parallèle à celle sur le poids des 1000 grains, comme on le constate d'ailleurs assez souvent. En effet le CCC a diminué le poids spécifique de 1 à 1,5 point en 1966 et d'environ 0,5 point en 1967 et 1968.

Action du CCC et de l'azote sur la hauteur des blés



Le CCC diminue la taille des blés d'environ 10 à 12 cm. L'azote, apporté au cours du tallage à la dose de 120 unités, augmente la taille d'environ 15 à 20 cm. Mais l'action de l'azote dépend beaucoup de la date d'apport. Elle est d'autant plus faible que l'apport est plus tardif. Elle est presque nulle au début de la montaison.

DOCUMENTATION  
SOPRA LICORNE

Or/ : Phytatrie  
Phytopharmacie

Approuvé : JM  
Réf. : N° 139/MC

A Classer : CEREALES 3

2 Janvier 1969.

INFLUENCE DU C.C.C. ( chlorméquat ) SUR QUELQUES MALADIES DES CEREALES  
par F. RAPILLY - Station Centrale de Pathologie Végétale - I.N.R.A.  
Versailles.

Il n'y a pas d'action directe du C.C.C. sur le développement des maladies des céréales sauf, dans certains cas, un léger effet fongistatique. Par contre le C.C.C. modifie les conditions de l'environnement. Ces conditions peuvent avoir des conséquences défavorables au développement des maladies ( épaissement des tiges dans le cas du Piétin verse) ou favorable ( retard de l'épiaison, augmentation de l'humidité relative, plus grande facilité de pollution). Si l'on se réfère à la biologie des parasites des céréales on constate que l'humidité relative ambiante et tout ce qui peut entraîner son augmentation, favorise le développement des maladies.

L'une des conséquences du C.C.C. est justement de permettre une augmentation de cette humidité dans la végétation, augmentation d'autant plus marquée que l'été est pluvieux. En accord, avec de nombreux auteurs, on ne peut donc conseiller, du point de vue de la Phytopathologie, l'emploi du C.C.C. dans les régions céréalières humides et pluvieuses pendant l'été.

COMITE REGIONAL DE FERTILISATION

ETUDE DE LA CONSOMMATION d'ENGRAIS EN FRANCE ET DE SON EVOLUTION, COMPARAISON  
AVEC QUELQUES PAYS.  
(Résumé )

I. EVOLUTION DE LA CONSOMMATION GLOBALE

Eléments Fertilisants	1960/61	1965/66	1970/71	% d'augmentation
N	19,3	28,7	48,5	251
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	32,0	43,3	62,3	194
K <sub>2</sub> O	26,	32,8	47,2	181
N+P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +K <sub>2</sub> O	77,3	104,8	158,	204

Note : Il s'agit de Kg d'Eléments par Ha de surface fertilisable.

II. VARIATION DE CETTE EVOLUTION SELON LES REGIONS  
au cours des 5 dernières années en Kg d'éléments/ha

Départements	1965/66	1970/71	% d'augmentat.	Classement (I) en 1970/71
LANDES	209,7	389,1	185,5	1
SEINE & M.	228,4	371,8	162,7	2
AISNE	201,1	262,1	130,	12
MTHE & MOSEL.	60,8	94,1	154,7	60
ARDENNES	87,6	132,2	139,4	49

(I) pour la consommation N+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+K<sub>2</sub>O

- commentaires -

III. ETUDE DE LA REPARTITION ENTRE LES PRODUITS

1°) Voir Annexe A

2°) MOTIVATIONS principales de l'évolution de la consommation respective des produits.

des consommateurs :

- prix
- gain de temps ou d'effort ( main-d'oeuvre rare et chère)
- Agronomie.

des producteurs :

- satisfaire les demandes des consommateurs
- comprimer les prix de revient.

d'où évolution vers les Composés :

- la granulation
- les hauts dosages
- le vrac
- le liquide
- le gazeux
- le rendu-racine, solide, liquide ou gazeux

3°. EVOLUTION du rapport Engrais simples/ Engrais Composés  
Part des E.C. en % de la Fertilisation totale

	1960/61	1965/66	1970/71
TOTAL :	49,6	55,2	64,2
dont Binaires	15,9	19,6	20,4
dont Ternaires	33,7	35,6	43,8

4°. EVOLUTION de la concentration des Engrais composés

( 1 )	1960/61	1965/66	1970/71
Toutes catégories	30,3	33,4	39,2
Ternaires	31,0		41,9
Binaires P.K.	29,0		34,4

(1) Teneur en  $N + P_2O_5 + K_2O$  dans 100 kg d'engrais

5°. EVOLUTIONS récentes des engrais simples :

AZOTE

- Solide - haut dosage - régularité granulation
- Liquide
- Gazeux

ACIDE PHOSPHORIQUE

- Scories
- Engrais phosphatés solubles simples ou composés.

POTASSE

- Haut dosage
- Granulation

6°. A UTRES EVOLUTIONS et TENDANCES

IV. COMPARAISON AVEC d'AUTRES PAYS - CAMPAGNE 1968/69

Chiffres du Ministère de l'Agriculture en Kg d'élément/ha de S.A.U.

	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
FRANCE	40	54	40
R.F.A.	73	63	82
ITALIE	29	26,3	10,2
PAYS-BAS	152	46,5	56
BELGIQUE	110	119,	118
LUXEMBOURG	59	52,	68
	<u>CAMPAGNE 1967/68</u>		
GRANDE BRETAGNE	49	36	34
DANEMARK	64	42	61
NORVEGE	60	48	57
IRLANDE	14	46	34

## FRANCE

	Campagne 70-71		Variations par rapport à 69-70		% de Variation en N + P + K		
	Tonnages	Eléments N + P + K	en tonnes d'engrais	en %	68-69	69-70	70-71
					67-68	68-69	69-70
<b>Ternaires</b>	4 417 665	1 850 020	+ 480 455	+ 12,2	+ 6,0	+ 9,6	+ 15,2
- pulvérulents	340 231	82 627	- 8 658	- 2,5	- 17,3	- 4,7	- 10,2
- granulés et liquides	4 077 434	1 767 393	+ 89 113	+ 13,6	+ 8,2	+ 10,6	+ 16,8
<b>Binaires azotés (NP+NK) (toutes catégories)</b>	447 192	189 157	+ 97 248	+ 27,8	+ 16,3	+ 6,1	+ 29,1
<b>Binaires PK</b>	2 750 719	946 993	+ 106 486	+ 4,0	+ 9,4	+ 6,6	+ 5,3
- scories potassiques	1 020 291	258 131	+ 21 112	+ 2,1	- 0,1	- 4,0	+ 2,5
- superpotassiques	968 400	429 053	+ 38 363	+ 4,1	+ 19,2	+ 13,6	+ 6,1
- phosphopotassiques	272 207	101 939	+ 11 557	+ 4,4	+ 5,1	- 3,9	+ 4,1
- divers binaires PK	489 821	157 870	+ 35 454	+ 7,8	+ 3,4	+ 18,5	+ 8,7
<b>Total des engrais composés</b>	<b>7 615 576</b>	<b>2 986 172</b>	<b>+ 684 189</b>	<b>+ 9,9</b>	<b>+ 7,1</b>	<b>+ 8,4</b>	<b>+ 12,6</b>

FERTILISATION TOTALE ( en tonnes d'éléments )

Eléments	Engrais composés		Engrais simples	Total
	Binaires PK	Ternaires et Binaires NP + NK		
Azote	-	589 146	839 105	1 428 251
Acide phosphorique	484 171	777 700	573 873	1 835 744
Potasse	462 822	672 333	253 660	1 388 815
<b>Total</b>	<b>946 993</b>	<b>2 039 179</b>	<b>1 666 638</b>	<b>4 652 810</b>
	2 986 172			

% DES ENGRAIS COMPOSES DANS LE TOTAL ( tous engrais simples et composés )

	1966/67	1967/68	1968/69	1969/70	1970/71
N	39,6	38,0	39,1	40,9	41,2
P	57,4	62,2	64,0	65,7	68,7
K	73,7	76,7	78,1	80,1	81,7
<b>N + P + K</b>	<b>57,5 %</b>	<b>59,3 %</b>	<b>60,9 %</b>	<b>62,8 %</b>	<b>64,2 %</b>

FERTILISATION MOYENNE A L'HECTARE ( tous engrais ) Surface Agricole Fertilisable = 29.454.600 Ha

	1966/67	1967/68	1968/69	1969/70	1970/71
N	32,3	38,8	40,0	41,7	48,5
P	46,8	51,9	54,4	58,0	62,3
K	34,6	39,2	40,8	43,4	47,2
<b>N + P + K</b>	<b>113,7</b>	<b>129,9</b>	<b>135,2</b>	<b>143,1</b>	<b>158,0</b>

## EVOLUTION de la PRODUCTION

On peut penser qu'il est raisonnable d'estimer que la production suit la consommation, même si les capacités des usines sont effectivement supérieures aux quantités produites. Le tableau ci-joint donne les chiffres rassemblés par l'Institut du Soufre de Londres pour 1970 ainsi que les estimations pour 1975.

### A.- EVOLUTION DE LA PRODUCTION et EMPLACEMENT DES PRINCIPALES USINES

#### 1°) AZOTE

Jusqu'à ces dernières années, les usines d'engrais avaient une dimension moyenne ou petite. Les unités d'azote avaient une capacité de fabrication de l'ordre de 150 à 250 tonnes par jour, soit 50 000 à 80 000 t. par an. Le progrès technique et la concurrence des américains puis de l'ensemble de l'industrie chimique ont imposé l'installation en France et en Europe d'unités beaucoup plus importantes. La capacité de fabrication est multipliée pratiquement par 10 si bien que les unités de production d'ammoniac construites à la fin des années 60 et ces derniers temps ont des capacités journalières de production de 1.000 tonnes/jour et même de 1.500 tonnes/jour, ce qui correspond à des productions annuelles de 3.500 tonnes à 5.500 tonnes d'ammoniac. De telles usines représentant des investissements considérables : 25 à 30 milliards anciens pour un atelier de 1.000/tonnes/jour, hors de portée des principales sociétés françaises productrices d'engrais si bien que ces dernières se sont associées pour envisager de tels investissements.

En France, on peut citer 6 grandes unités :

- A CONFREVILLE, les installations sont la propriété de la Société Normande de l'Azote, détenue à 44 % par l'Entreprise Minière et Chimique, et 56 % par la COFAZ ( Compagnie Française de l'Azote). Cette dernière étant elle-même constituée à 67 % par Pierrefitte-Auby, et 33 % par le groupe de la Compagnie Française des Pétroles et de la Compagnie Française de Raffinage.

Sur le même site se trouve une usine de 800 tonnes par jour d'urée qui a les mêmes propriétaires que les installations d'ammoniac.

- A NANGIS, l'unité de production d'ammoniac appartient pour 40 % à la Société des Engrais de l'Ile de France, elle-même constituée à 47 % par les Charbonnages de France, 47 % par la Société Chimique de la Grande-Pa- roisse, 6 % par Elf-Erap ; quant aux 60 % majoritaires, ils sont détenus par la Société Rhodanienne des Engrais, constituée à 70 % par Ugine-Kuhlmann, et 30 % par l'Entreprise Minière et Chimique.

Deux usines d'ammonitrates et d'engrais complexes ont été construites à Nangis dans le même temps. Elles sont la propriété de la Société des Engrais de l'Ile de France.

Développement de la consommation des engrais dans les 10 pays de la CEE

(en '000 t. d'éléments nutritifs)

	Consommation potentielle (recommandée)				ANNÉE 1970									ANNÉE 1975								
					Consommation actuelle				Différence en comparaison avec potentiel			Estimation de la consommation actuelle				Différence en comparaison avec potentiel						
	N	P205	K2O	total	N	P205	K2O	total	N	P205	K2O	N	P205	K2O	total	N	P205	K2O				
Belgique	258	168	250	676	190	165	190	545	68	-	60	262	192	260	614	11	-	42				
France	3.784	2.910	3.558	10.252	1.120	1.610	1.270	4.060	2.604	1.303	2.288	1.450	1.800	1.570	4.770	2.334	1.113	2.028				
R.F.A.	1.581	1.139	1.416	4.136	1.620	850	1.335	3.205	561	289	81	1.250	955	1.500	3.745	291	184	-				
Italie	3.757	2.490	2.348	8.795	560	345	200	1.275	3.197	1.975	1.348	740	625	265	1.680	3.042	1.835	2.233				
Pays-Bas	396	225	261	882	380	125	140	645	16	100	121	440	140	148	728	-	85	113				
Luxembourg	en rappel																					
Totaux	9.776	6.929	8.033	24.738	3.320	3.265	3.135	9.720	6.446	3.667	4.298	4.140	3.742	3.641	11.493	5.680	3.247	4.476				
République d'Irlande	716	382	374	1.502	60	146	125	331	686	236	240	81	160	138	379	665	222	236				
Norvège	131	69	92	292	75	55	57	187	46	16	34	90	61	57	208	31	8	34				
Royaume-Uni	1.266	1.057	1.104	3.427	825	500	472	1.797	441	557	622	920	535	518	2.043	276	522	585				
Danemark	Chiffres non disponibles																					

(Source : The Sulphur Institute - Internal report n° 10)

B - EVOLUTION DE L'INDUSTRIE COMMUNAUTAIRE DES ENGRAIS DEPUIS LA CREATION DU MARCHE COMMUN.

---

1°) L'industrie des engrais en 1958

En 1958, l'Industrie européenne des engrais présente tous les signes d'une bonne santé.

- Industrie ancienne, technique de production éprouvée, main-d'oeuvre abondante et bien adaptée.
- Expansion basée sur une forte demande intérieure.

Ses faiblesses sont cependant certaines.

Sur le plan technique : Prolifération de petites unités.

Sur le plan commercial : Réseaux archaïques → infinités de formules.

Politique des entreprises, cartels maintenant des producteurs marginaux.

L'ouverture des frontières correspond à une transformation des procédés de fabrication permettant d'introduire le gigantisme. Dans le même temps, les pays en voie de développement s'équipent et comme leur demande intérieure est faible, ils se tournent vers le marché international.

2°) L'ouverture des frontières

Le réveil est donc très brutal : Concurrence très vive

Surproduction importante

Erreurs dans les prévisions de marché, qui tendaient à faire croire que les pays sous développés ( faim dans le monde) représenteraient un marché potentiel important.

Agricultures plus productives mais inféodées à la politique des gouvernements.

Aux U.S.A., les problèmes ne sont pas tout à fait similaires car les producteurs n'ont pas eu à subir de concurrence internationale sur leur marché au moment de leur mutation. De plus, ils bénéficièrent d'une aide de leur gouvernement pour écouler leurs excédents sur le marché international.

Dans la C.E.E. , la production doit faire face à la fois à :

- la concurrence des U.S.A.
- celle des pays de l'Est et de plusieurs pays en voie de développement,
- abandon d'un certain nombre de marchés sous la pression de l'A.I.D. américaine et de l'expansion japonaise.
- la transformation de leur marché.

Dans le cadre de la C.E.E., l'aide sous forme de protectionnisme n'était pas possible.

3°) La transformation de l'industrie des engrais dans la C.E.E.

Que s'est-il passé ?

1ère phase : Attaque des pays les mieux préparés à l'exportation

(Belgique, Hollande) des marchés les plus gros et les plus rémunérateurs ( France, Allemagne). D'où effondrement des prix, perturbations dans les réseaux de distribution.

- A GRAND-CUEVILLY , Péchiney-St-Gobain détient 50 % des installations, l'Azote et Produits chimiques ( filiale de l'Entreprise Minière et Chimique), 27,5 % et la COFAB 22,5 %.
- A TOULOUSE, l'Azote et Produits Chimiques a construit, quasiment seule son unité de production.
- A CARLING, C.D.F. Chimie, la Société Chimique des Charbonnages, détient la sienne ; elle a aussi une unité de 680 à 700 tonnes par jour à Mazingarbe.
- A P.E.C. -RHIN, la Société Azote et Produits Chimiques vient de construire, à 50 % avec la Badische Anilin und Soda Fabrik ( qui détient sa part par l'intermédiaire de Wintershall), une unité de production de 600 tonnes par jour.

## 2°) ACIDE PHOSPHORIQUE ET COMPLEXES.

Comme pour l'azote, la tendance est au gigantisme, dans une moindre proportion cependant, car les prix de revient entre les grosses unités et les plus petites ne sont pas différents. D'autre part, plus que pour l'azote, les usines sont à deux fins : agricoles et industrielles. Les producteurs d'engrais sont en effet également fabricants des grands intermédiaires de l'industrie chimique ( ammoniac, acides sulfurique, phosphorique, nitrique, etc... ) Les usines productrices d'acide phosphorique et d'engrais complexes sont surtout situées dans les ports équipés pour recevoir des pondéreux étant donné les approvisionnements importants en matières premières encombrantes : soufre, pyrites, phosphates, sels de potasse etc.. Par ailleurs, il faut prévoir dans les usines productrices d'acide phosphorique, soit de grandes étendues destinées à recevoir les fortes quantités de sulfate de chaux résiduel ( 3 tonnes de sulfate de chaux sont produites pour chaque tonne d'acide phosphorique), soit des installations permettant de rejeter le sulfate de chaux dans le courant des fleuves ou dans la mer.

Les principales usines sont situées dans les zones portuaires des grands fleuves européens ou sur le bord de la mer :

Exemples :

- Le Rhin ( Ruhr en Allemagne, Rotterdam en Hollande)
- Bouches de l'Escaut et grands canaux du Bénélux ( Anvers, Rieme, Sas de Gand).
- Basse-Seine (ROUEN, le HAVRE )
- Loire ( Saint-Nazaire, Nantes)
- Garonne ( Bordeaux)
- Etang de Thau.

## 3°) LA POTASSE

Les mines françaises sont en voie d'épuisement. Par ailleurs, de forts gisements ont été découverts notamment au Canada et au Congo. On peut donc prévoir dans l'avenir, au moins pour la France, qu'une grande partie des engrais potassiques seront importés.

2ème phase : Restructuration de l'industrie communautaire des engrais

- Rationalisation de la production : gigantisme, fermeture de petites unités.
- Réduction des frais de commercialisation ( transports, passage en dépôts, diminution des gammes).
- Innovation dynamique :
  - . création liquides
  - . engrais plus solubles et plus concentrés
  - . distribution en vrac
  - . Eppardage plus précis

3ème phase : Organisation plus précise des entreprises

- Gestion autonome du secteur " engrais " dans les grandes entreprises diversifiées.
- Alliances nouvelles : les grandes entreprises fusionnent.
- On cherche à se rapprocher de l'utilisateur.

4°) L'avenir de l'industrie des engrais dans la C.E.E. élargie (Europe des 10)

a) l'Offre :

Le marché sera dominé par 2 faits :

- une demande intérieure faible 3,5 %
- la permanence d'un fort excédent à exporter.

Hypothèse : Evolution de la consommation de 70 à 75

- (N : 4,5 à 5 % par an
- (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : 2,5 par an
- (K<sub>2</sub>O : 3 % par an

b) La demande :

On peut admettre que les décisions des agriculteurs seront dominées par 3 séries de facteurs :

- Expansion faible,
- Objectifs plus variés qu'au cours des dernières années.
- Le point de vue économique sera prépondérant.

c) Comment l'industrie des engrais peut-elle s'armer pour faire face à cette situation ?

a) Rationaliser la production

1°) En adaptant la taille des entreprises aux caractéristiques du marché. Les prochaines alliances peuvent ne pas être à caractère national. En effet, l'accroissement de la consommation de la C.E.E. élargie soit 1.000.000 t N, 500.000 t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 600.000 t K<sub>2</sub>O est faible car elle peut être assurée par une unité de 3.500 t/j d'ammoniac et 2 ateliers de 750 t/ de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> si l'on ne tient pas compte des fermetures d'ateliers vétustes.

2°) En localisation avec précision les nouveaux investissements

A ce sujet, il ne faut pas oublier qu'en matière de transport, ce sont les chargements, déchargements et les stockages intermédiaires qui représentent le coût majeur de l'opération.

En matière d'acide phosphorique, on sait maintenant que le commerce international est possible sur des distances appréciables. Les pays possesseurs de minerais sont bien placés mais les investissements européens dans ces pays seront justifiés dans la mesure où l'on aura la conviction qu'ils assureront des profits durables. L'industrie européenne de l'acide phosphorique conserve tout son intérêt dans la mesure où les pays desservis par les implantations industrielles puissantes des ports maritimes sont de bons consommateurs, par contre l'exportation hors de la C.E.E. paraît incertaine.

3°) En spécialisant certaines entreprises en fonction de vocations qui leur sont propres.

- Rapprochement des tonnages de certaines usines,
- Recherche de la production de produits standardisés pour les grosses unités.
- Adaptation des petites entreprises à certaines productions diversifiées apportant un service ou bien adapté à sa clientèle
- Accord entre producteurs " complémentaires ".

b) S'informer et promouvoir la recherche

- S'informer de façon à connaître la volonté des autres et à pouvoir mieux adapter sa politique.
- Adapter la recherche aux besoins nouveaux du marché. Celui-ci risque d'être modifié par des objectifs plus qualitatifs et économiques que quantitatifs.
- Augmenter la collaboration entre les producteurs et les centres de recherche.

c) Politique de l'exportation

Exporter est une nécessité pour l'Europe des 10. Elle le restera encore longtemps.

Sur les 17 millions de tonnes du commerce international, les pays développés représentent les 2/3 des débouchés. Or, les prix pratiqués sont très bas et par conséquent non rémunérateurs à cause d'une concurrence très vive;

U.S.A.

Pays en voie de développement : Pour l'azote : Golfe Persique  
Vénézuéla

Pour le  $P_2O_5$  : Afrique du Nord  
Iran  
Mexique

Pour le  $K_2O$  : Congo

Les pays en voie de développement pourront approvisionner tous leurs besoins dans les 5 ans à venir grâce à leurs productions. Ils ne seront donc pas des clients possibles de l'Europe. Or, seule la demande de ces pays pourrait augmenter. Pour cela, il faut intervenir sur la demande d'engrais et en même temps sur les autres facteurs de la croissance de la production agricole et industrielle.

Sans doute, plus de collaboration avec les organisations mondiales F.A.O, Banque Mondiale, O.C.D.E. seraient souhaitables.

## LA LEGISLATION SUR LE COMMERCE DES ENGRAIS

ET

### L'HARMONISATION DES REGLEMENTATIONS DANS LE CADRE DE LA C.E.E.

---

Le commerce des engrais est assujéti à une réglementation déjà ancienne puisque les textes de base sont :

... la loi du 4 février 1888 signée par le Président Carnot, modifiée par :

- la loi du 19/3/1925
- la loi du 28/3/1936
- la loi du 15/3/1943

A ces textes sont venus s'ajouter :

- le décret du 29/4/1937 portant règlement d'administration publique pour l'application des dites-lois, et différentes circulaires d'interprétation destinées aux agents de la Répression des Fraudes.

Il serait souhaitable que cette réglementation soit adaptée aux conditions techniques actuelles.

#### Historique :

L'utilisation des engrais minéraux remonte aux années 1840 après que le chimiste allemand Liébig eut prouvé que les végétaux tiraient leur substance des sels minéraux en solution.

La première usine de super-phosphates a été installée en Angleterre en 1843.

Dans l'histoire des engrais, les premières tractations commerciales ont porté sur les importations de " guano " du Pérou, et sur le " noir animal " de raffinerie, utilisés comme engrais phosphaté dans la région de Nantes ( ce noir contenant 0,3 à 2 % d'azote organique, et 18 à 25 % de  $P_2O_5$  insoluble)

A l'époque les falsifications de ces produits étaient nombreuses et il s'agissait pour le commerce de choisir des critères analytiques pour déceler la fraude.

C'est le chimiste J.B. DUMAS qui avec la collaboration de BOUSSINGAULT a établi ces règles analytiques qui ont porté successivement sur l'azote puis l'acide phosphorique, puis la potasse et enfin sur les amendements calcaires. La réglementation actuellement en vigueur a été construite sur ces bases.

L'esprit de la loi est de protéger l'acheteur contre les tromperies ou tentatives de tromperie. C'est une loi de Répression.

Nous étudierons successivement :

1. LES DISPOSITIONS DE LA LOI DANS LES GRANDES LIGNES
2. COMMENT S'EFFECTUE LE CONTROLE DE LA QUALITE ET DE LA VENTE DES ENGRAIS ?
3. L'HARMONISATION DE LA REGLEMENTATION DANS LE CADRE DE LA C.E.E.

## 1. LES DISPOSITIONS DE LA LOI DANS LES GRANDES LIGNES

Qu'est-ce qu'un engrais ?

Selon la définition légale, le terme " engrais " ne peut s'appliquer qu'à un produit ayant une teneur garantie en un ou plusieurs éléments fertilisants reconnus par la Loi, à savoir N,  $P_2O_5$  et le  $K_2O$ .

Seuls les principes actifs N, P et K sont retenus en France pour valoriser un engrais. Autrement dit, on ne peut pas garantir dans les fertilisants d'autres éléments que ceux-ci.

Ceci exclut donc de la classe des engrais, les éléments dits secondaires comme le soufre et la magnésie, de même que les oligo-éléments.

Pour tout engrais, il doit être fait mention d'un dosage minimum garanti sur n'importe quelle quantité du produit. Ceci implique donc une homogénéité parfaite.

Les produits d'origine naturelle comme le fumier, les composts, ne sont donc pas des engrais au terme de la loi parce qu'ils ne sont pas homogènes.

Toutefois, si ces produits naturels ont subi un traitement industriel dans le but de les rendre homogènes, et surtout s'ils ont reçu une addition d'engrais minéral, ils entrent sous le coup de la loi.

La vente des " gadoues " fait l'objet d'une circulaire particulière en date du 22 avril 1966.

Théoriquement, la loi ignore l'usage des termes " simples " "complexes " et " composés ", mais ces désignations doivent correspondre à des catégories de produits déterminés.

C'est ainsi que le terme " engrais composé " doit obligatoirement concerner des produits renfermant les trois éléments. La Répression des Fraudes peut intervenir pour vérifier si ces termes sont bien utilisés.

### Cas de la craie phosphatée :

C'est un produit contenant à la fois de la chaux et du  $P_2O_5$ . S'il est vendu comme amendement, c'est sa teneur en chaux qui est prise en considération ; mais s'il est vendu comme engrais phosphaté, il faut qu'il soit homogène, que sa teneur en  $P_2O_5$  soit garantie, et il est alors interdit de faire état de la teneur en chaux.

### Dénomination - Provenance - Etat de combinaison - Dosage etc...

#### Dosage :

La teneur en éléments fertilisants est exprimée par le poids de ceux-ci par 100 kg de marchandise telle qu'elle est livrée : il est interdit d'exprimer le dosage par le poids sur le produit séché à 100°.

Les dosages mentionnés sont des minimums garantis. C'est donc une obligation qui distingue la loi française de certaines lois étrangères, la loi allemande par exemple qui prévoit la facturation sur la base du dosage réel.

En France et dans les faits, on tolère un écart en moins de 1/10ème d'une unité entre le dosage annoncé et le dosage effectivement livré. Cette tolérance de 0,1 est l'ordre de grandeur de l'erreur analytique probable.

La loi française fait obligation d'éclairer l'acheteur sur l'origine, la provenance, l'état de combinaison des produits vendus.

Origine : En ce qui concerne l'origine, il s'agit de mentionner le nom et l'adresse du fabricant ou de la firme qui a fait fabriquer l'engrais.

Dénomination : toute dénomination susceptible de tromper l'acheteur est rigoureusement prohibée.

Nature ou état de combinaison : La nature ou l'état de combinaison des principes fertilisants doivent être mentionnés de façon précise.

Pour l'azote : comme origine, il n'y a que l'azote organique, nitrique et ammoniacal.

Du point de vue agronomique, l'azote de la cyanamide et celui de l'urée, sont assimilés à l'azote ammoniacal en raison de leur prompt transformation en ammoniacal dans le sol.

Mais la loi rend obligatoire l'indication d'origine :

- azote uréique ou
- azote cyanamidique

Pour les nouvelles formes d'azote à action lente ( engrais obtenus par réaction catalysée dont l'urée et la formaldéhyde, type Azargan), il a été admis d'utiliser le terme " azote de synthèse ".

Pour l'acide phosphorique, on a recours aux tests de solubilité et c'est ainsi qu'on obtient le dosage en  $P_2O_5$  :

- soluble eau
- soluble dans le citrate d'ammoniaque ( phosphaté bicalcique)
- insoluble dans l'eau
- soluble dans l'acide citrique ( scories).

La mention du  $P_2O_5$  total qui comprend donc la fraction insoluble qui, dans les engrais composés, est une disposition unique qui caractérise la loi française, car les réglementations étrangères ignorent le  $P_2O_5$  insoluble dans les engrais composés.

Notons, qu'en France, la distinction du " soluble eau et du soluble citrate " n'est pas obligatoire. On peut grouper les deux et dire " soluble eau et citrate ".

Dans le cas des scories Thomas 18 %, on dit en France :

18 % de  $P_2O_5$  insoluble dans l'eau, dont 75 % dans l'acide citrique à 2%

En Belgique, pour le même produit on indiquera :

14 % de  $P_2O_5$  soluble dans l'acide citrique.

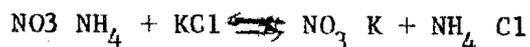
Remarques :

Il faut remarquer que le dosage des engrais phosphatés par la méthode officielle ne permet pas de déterminer les formes suivantes :

- pyrophosphate
- métaphosphate
- polyphosphate

Or, ces formes peuvent exister dans les engrais en raison de leur présence dans les matières premières. Il faut aussi noter que le test de solubilité est en fait: un critère chimique qu'il faut distinguer de l'assimilabilité pour laquelle, en fait, il n'existe pas encore de critère biologique rapide.

Pour la potasse : seule la solubilité de l'eau est reconnue : elle ne pose pas de problème particulier. Il faut pourtant noter ici le cas des sels de potasse, dont la présence dans l'engrais est attribuée aux résultats d'une réaction de double décomposition. La loi n'en parle pas, mais le mécanisme de cette réaction est admis par la loi, exemple :



La mention S pour les engrais sans chlore est maintenant reconnue, mais en principe elle devrait être limitée aux engrais à base uniquement de sulfate de potasse ou de sulfate d'ammoniaque.

Cette lettre invoquant l'idée de soufre, on connaît les abus commis dans la pratique courante, et qui tendent à classer sous la catégorie S des engrais renfermant en fait une quantité notable de chlore. Tant que la réglementation n'imposera pas un maximum de chlore à ne pas dépasser (exemple, inférieur à 2 %), on sera sans action contre ces abus.

#### Provenance :

La mention des provenances est obligatoire : en fait, il est très difficile de vérifier l'exactitude des origines chimiques annoncées.

#### Étiquettes

L'étiquetage des sacs qui est obligatoire, fait l'objet d'une réglementation très rigoureuse (décret du 29.4.1937).

A noter qu'un distributeur ensachant de l'engrais reçu en vrac, est tenu à l'étiquetage sur la base des documents commerciaux qu'il a reçus de l'usine.

Comme nous l'avons vu, il ne peut être fait mention autres que l'azote, l'acide phosphorique et la potasse, et ceci s'applique aussi à l'étiquetage.

Une étiquette qui ferait, par exemple, état de soufre, de magnésium, n'est pas légale, de même qu'une étiquette mentionnant une teneur en chaux, une teneur en matière organique ou humique.

La composition doit être exprimée par un seul chiffre.

Il est formellement interdit aussi d'indiquer sur l'étiquette (et même sur le sac) le mode d'emploi de l'engrais.

#### Poids garanti

Le poids livré à garantir est le poids net, c'est-à-dire, le poids de l'emballage en plus.

Dans certains pays, comme en Hollande le poids du sac est compris dans le poids facturé.

#### Quelques cas particuliers :

Les oligo-éléments : Il est admis que le bore peut être mentionné

mais le qualificatif " boraté " adjoint au mot engrais est rigoureusement interdit. De toute façon, on ne peut déclarer de dosage garanti pour les oligo-éléments.

Les engrais en vrac : Le vrac est autorisé à condition qu'un document d'accompagnement donne les détails légaux sur le produit.

Les sacs à valve : dans le cas des sacs courants, les étiquettes doivent être cousues avec le sac, ou fixées à l'emballage par une ficelle avec plombage.

Or, les sacs à valve posent à cet égard un cas particulier ; mais il faut préciser que le placement d'une étiquette dans la valve du sac, n'est pas une solution satisfaisante.

Il est donc nécessaire d'imprimer sur le sac, le texte habituellement mis sur l'étiquette.

Les engrais horticoles : ils sont vendus en emballage ne devant pas excéder 20 Kg. Pour ces produits, la législation de l'étiquetage est tout autre. Il est permis d'indiquer les teneurs N - P - K sans plus de détails.

Le bulk-blending : il n'est autre que le mélange extemporané d'engrais simples granulés et, qui en principe, est préparé à la demande de l'utilisateur. Comme il se produit une ségrégation entre les composants du mélange, en réalité on a affaire à un produit hétérogène.

Il n'est donc pas possible d'assurer le dosage garanti sur n'importe quelle fraction du produit comme la loi l'exige. Cependant, le bulk-blending est autorisé en France en facturant les matières premières composant le mélange sur la base du prix des engrais simples.

Les engrais liquides : la réglementation sur les engrais, veut que les teneurs en principes fertilisants soient exprimées en poids pour 100 kg du produit. Cependant, il est admis pour les engrais liquides que les teneurs peuvent être inscrites simultanément en poids et en volume sur deux tableaux distincts dans des caractères identiques.

Les insecticides engrais : ils sont considérés comme des spécialités phyto-sanitaires, et doivent faire l'objet d'une demande d'homologation.

La législation prévoit pour ces engrais des taux d'emploi obligatoirement compris entre 600 et 800 kg. les doses homologuées d'insecticides étant de :

- 3 à 4 kg M.A./ha pour l'adrin et l'heptachlore

- 1 kg 500 M.A./ha pour le lindane.

### Les Sanctions Pénales

L'inobservation des prescriptions légales peut entraîner pour les contrevenants une action judiciaire qui relève :

- soit de la compétence du Tribunal de simple police pour les petits délits comme par exemple : la façon de rédiger les étiquettes,
- soit du Tribunal correctionnel pour les délits jugés plus graves, et c'est le cas de " tromperie ou tentatives de tromperie sur la nature des engrais, leur composition, leur dosage, l'utilisation de marques contrefaites ".

## 2. COMMENT s'EFFECTUE LE CONTROLE DE LA QUALITE ET DE LA VENTE DES ENGRAIS ?

### a - Contrôle officiel

En France, c'est le Service de la Répression des Fraudes et du Contrôle de la qualité, lequel relève du Ministère de l'Agriculture qui est chargé de surveiller l'application de la réglementation.

Ce Service dispose d'un réseau d'inspecteurs habilités à effectuer tout prélèvement d'échantillons aux fins de contrôle, lequel contrôle est confié à un laboratoire officiel d'analyses.

Trois laboratoires sont désignés officiellement :

- le laboratoire de Laon dépendant de la Station Agronomique de l'Aisne (M. HEBERT)
- le Centre Agronomique du sud-ouest à Bordeaux ( Directeur M. DELMAS)
- le laboratoire municipal de Grenoble.

Le prélèvement d'échantillons qui doit comporter 4 exemplaires, fait l'objet d'un procès-verbal de prise d'échantillons.

Les procédés d'analyses pour la détermination des principes actifs sont fixés par la loi.

Les résultats font l'objet d'un procès-verbal, et le dossier est envoyé au Procureur de la République s'il y a lieu.

### b - Contrôle préventif à l'usine du producteur

La régulation du dosage et sa couverture rigoureuse est extrêmement délicate sinon impossible à réaliser dans la pratique industrielle.

Ceci provient :

- des fluctuations intervenant dans la fabrication et inhérentes à l'équipement ;
- de l'incertitude due à l'échantillonnage car il existe un problème de l'échantillonnage ;
- de l'incertitude due à l'analyse.

En fin de compte, on enregistre une dispersion des résultats autour du dosage escompté.

Ce que les industries demandent, c'est que le dosage garanti à la tolérance près, soit appliqué sur tout le lot livré.

Actuellement, et dans une certaine mesure, on commence à pratiquer avec l'accord des industriels des contrôles préventifs aux usines.

Ces contrôles n'ont pas un caractère répressif, il s'agit au contraire d'une tentative de collaboration de l'industrie avec les services officiels.

Ils sont effectués environ tous les mois. Il est maintenant admis par le Service de la Répression des Fraudes que des dossiers de contrôle en usines, peuvent être produits en cas de litiges.

Des règles d'échantillonnage étudiées par l'industrie, ont été proposées à l'A.F.NOR mais ces travaux n'ont pas encore la reconnaissance officielle.

### c- Cas où un contrôle de dosage est effectué à l'instigation de l'acheteur

L'acheteur est en droit de faire contrôler à ses frais le titre des engrais qu'il reçoit, ce qui le conduit dans la majorité des cas à se croire en droit de faire lui-même et seul les prélèvements qu'il envoie ensuite pour analyse à un laboratoire de son choix.

Cette façon de procéder conduit habituellement à des constatations interminables entre vendeur et acheteur quand les résultats annoncés sont en défaut.

Les habituelles tentatives de conciliation étant mises à part, l'industrie livrante et son vendeur sont en droit de récuser le laboratoire et les résultats de son analyse si l'échantillonnage n'a pas été fait en "bonne et due forme".

Il est dans l'intérêt même de l'acheteur d'informer le vendeur de ses intentions en l'invitant à prendre part aux opérations d'échantillonnage, et de dépôt au laboratoire.

L'opération du prélèvement donne lieu à des règles bien établies qu'il convient de ne pas transgresser sous peine de nullité.

Ces règles exigent notamment, la présence de deux témoins, la prise de quatre échantillons qui sont ensuite cabotés, et la rédaction du procès-verbal qui assurera l'authenticité des échantillons.

Le détail de ces opérations est rappelé dans une note spéciale qui est remise à chaque inspecteur commercial.

### 3. HARMONISATION DES REGLEMENTATIONS DANS LE CADRE DE LA C.E.E.

La réglementation sur la vente des engrais est différente entre les pays de la C.E.E. ; la loi hollandaise se rapproche de la loi allemande, et grosso modo la réglementation italienne et la réglementation belge ressemblent à la loi française.

La C.E.E. a pour objectif de favoriser la libre circulation des engrais entre pays, ce qui pose le problème d'harmonisation des réglementations.

Des experts représentant les industries, les agriculteurs et les agronomes, se réunissent en groupes de travail depuis 1963, et n'ont pas encore réussi à mettre sur pied une directive supra-nationale. Ils ont tenu leur XVIIème réunion de travail le 20 Octobre dernier.

Quels sont les points de divergence ?

Il n'est pas possible de les examiner en détail ici, et l'on s'en tiendra à l'exemple du  $P_2O_5$  dans les engrais composés.

L'obligation en France de préciser les états de combinaison ou provenance, est ignorée des autres pays, et ceci est vrai en particulier pour le  $P_2O_5$ .

La France est aussi le seul pays où il est fait mention du  $P_2O_5$  total avec mise en évidence du  $P_2O_5$  insoluble qui est valorisé, alors que dans les autres pays on ne fait pas état du  $P_2O_5$  insoluble dans les engrais ternaires.

Enfin, il y a le cas de la solubilité citrique qui est déterminée par un réactif sensiblement différent selon les pays, et qui donne un résultat également différent pour un même produit (écart de 30 % parfois) sur le dosage du phosphate bicalcique.

En quoi les réactifs citriques diffèrent-ils suivant les pays ?

- Le citrate d'ammoniaque alcalin dit de Joulie, c'est celui utilisé en France ; il est le plus alcalin. Il est utilisé au froid. C'est le réactif le plus sévère quant aux résultats puisque c'est celui qui solubilise le moins de  $P_2O_5$ .
- Le citrate ammoniaque alcalin de Petermann : ( Belgique, Allemagne, Luxembourg) Il est modérément alcalin, et est utilisé à 38-40° de température.
- Le citrate neutre : sa concentration est voisine de celle du citrate de Petermann. Il est amené au pH 7 exactement, et utilisé à 65° de température. Employé en Hollande ( et aux U.S.A.)
- Le citrate Italien : c'est, en principe, un citrate neutre

Ces 4 citrates présentent donc certaines différences quant à leurs aptitudes à la mise en solution des différents phosphates. Il suffit de retenir que ce sont les citrates neutres qui attaquent le plus de phosphate tricalcique et de  $P_2O_5$  rétrogradé.

Il y a cependant exception à l'égard du Phospal ( 34 % de  $P_2O_5$  dont 26 % soluble dans le citrate de Joulie) car sa solubilité est moins grande dans le citrate neutre.

Il semble maintenant qu'un accord international est sur le point d'être conclu pour que soit adopté :

- Le Joulie pour les engrais dont le Phospal est le seul constituant phosphaté ;
- le Petermann pour les engrais à base de bicalcique ou de Rhenania ( pour les engrais composés si les types en contenant sont caractérisés à part) ;
- le citrate neutre mais avec prise d'essai accrue ( sans doute 2,5g) pour les engrais composés du type général.

A remarquer qu'rien n'a encore été réglé au sujet des tolérances de dosage et des oligo-éléments.

Dans l'état actuel des choses une directive supra-nationale est arrêtée depuis janvier 1971, ce qui d'après les dispositions du traité de Rome, qui donne 18 mois aux gouvernements pour passer à l'application, laisserait envisager l'entrée en vigueur de la réglementation européenne dans le courant de 1973.

De toutes façons, il est à envisager un régime transitoire au terme duquel les engrais ne sortant pas des frontières seraient soumis à la loi nationale en cours.

En résumé, et jusqu'à nouvel avis les engrais d'importation sont présentés conformément à la loi du pays dans lequel ils sont vendus.

## COMMERCIALISATION DES ENGRAIS

### 1. PREAMBULE

Acte de vente : acceptation mutuelle de deux ou plusieurs parties se traduisant par l'échange d'une marchandise et d'un service contre de l'argent.

### II. DIFFERENTES FORMES DE COMMERCIALISATION

Cinq producteurs environ et quelques grossistes plus communément appelés courtiers vendent par l'intermédiaire de leur réseau :

- aux coopératives,
- aux négociants,
- très accessoirement, directement en culture par l'intermédiaire d'agents commissionnaires ( forme de vente peu pratiquée pour deux raisons :
  - . concurrence d'un producteur aux réseaux traditionnels,
  - . problème de paiement.

D'années en années le circuit traditionnel s'amenuise par disparition de certains petits négociants et par fusion de coopératives.

### III. COMMERCIALISATION DES ENGRAIS : CAS DU MARCHE FRANCAIS

Ces dernières années, l'apparition de nouvelles unités de fabrication 1000 t par jour, l'importation croissante ont bouleversé les échelles de prix, entraînant une dégradation progressive du marché des engrais menaçant l'avenir de la chimie minérale qui, comme vous le savez, est le support de la chimie organique. L'Etat dont les intérêts sont importants a donc favorisé la création de la S.D.A.C. ( Association des producteurs français d'azote).

Cet organisme régleme toute la commercialisation des engrais simples et composé, solides et liquides ( contrat, transport, facturation).

Les prix des engrais sont fixés par arrêtés ; ils font généralement apparaître en particulier pour les engrais azotés des différences sensibles entre les mois de faible consommation et les périodes de plein emploi.

### IV. PRINCIPES DE LA COMMERCIALISATION

#### 1. Notion de morte saison ( en exemple l'azote)

Les usines produisent sans interruption, l'utilisation de l'azote a lieu surtout au printemps. Ceci entraîne la notion d'échelle de prix ; le producteur ayant tendance à proposer ses produits moins cher pendant la période où la consommation est faible pour dégager le carreau de ses usines.

#### 2. Notion de contrat

S'explique pour les raisons invoquées au paragraphe III. Le contrat est passé entre la S.D.A.C. et l'acheteur par l'intermédiaire du producteur vendeur.

Deux types de contrat : - contrat d'approvisionnement,  
- contrat de consignation.

3. Echelonnement mensuel des prix et des délais de paiement pour la campagne 1971/72.

M O I S	Indice de prix	Délais de paiement sans agios	
		N	N P K
<u>1er palier</u>			
JUIN .....	100,		
JUILLET .....	100,75		
AOUT .....	101,50		
SEPTEMBRE .....	102,25	30 JOURS	90 JOURS
<u>2ème palier</u>			
OCTOBRE .....	105,60	FIN DE MOIS	FIN DE MOIS
NOVEMBRE .....	106,35	DE	DE
DECEMBRE .....	107,10	LIVRAISON	LIVRAISON
JANVIER .....	107,85		
<u>Période d'utilisation</u>			
FEVRIER .....	111,20		
MARS .....	111,20		
AVRIL .....	111,20		
MAI .....	111,20		

4. Avantages de l'échelle des prix

Permettait aux distributeurs de constituer en période de morte saison des stocks dans des magasins.

Il en résulte que :

- les distributeurs sont assurés de trouver grâce aux écarts de prix accordés :
  - . la couverture des frais résultant du magasinage, intérêt de l'argent, frais de conservation, manutention, amortissement des magasins.
  - . un bénéfice supplémentaire indépendant du taux de marque auquel ils sont autorisés.
- les usines productrices, ayant la possibilité d'assurer en période de morte saison l'écoulement de leur production, sont à même de fabriquer toute l'année au même rythme et de répondre ainsi aux besoins de la consommation avec les meilleurs prix.
- Par suite le distributeur peut grâce à ses stocks satisfaire en temps utile les besoins de ses clients sans risquer de manquer des ventes.

**SOCIETE DES ENGRAIS AZOTES  
ET DES ENGRAIS COMPLEXES**

Société Anonyme

à Capital et Personnel variables

Tour Aquitaine - 92 COURBEVOIE

CAMPAGNE 1971 - 1972  
ENGRAIS AZOTES  
SOLIDES et LIQUIDES

**CONTRAT D' APPROVISIONNEMENT N° \_\_\_\_\_**

Notre désigné ci-après sous le nom "d'Acheteur"  
et la Société désignée ci-après sous le nom de "Vendeur" agissant d'ordre et pour compte de la **SOCIETE DES ENGRAIS AZOTES ET DES ENGRAIS COMPLEXES (S.D.A.C.)** et représentée par :

Il est convenu ce qui suit :

**I - TONNAGE CONTRACTE.** - L'acheteur passe commande ferme au vendeur qui l'accepte, des tonnages d'engrais azotés, pour ventes de culture, précisés au verso. Il s'engage à en prendre livraison entre le 1er juin 1971 et le 31 janvier 1972 aux conditions générales de vente de la S.D.A.C. et aux conditions particulières ci-après exposées.

**II - TRANSMISSION DES COMMANDES.** - L'acheteur est seul responsable des instructions nécessaires à la livraison des tonnages contractés. Il s'engage à faire parvenir lesdites instructions (notamment cables relatives au dosage, au conditionnement et à la destination) pour au moins 90 % du tonnage contracté avant le 31 octobre.

**III - PRIX FACTURES.** - Contrairement aux commandes hors contrat qui seront automatiquement facturées aux prix en vigueur le jour de l'expédition, les commandes sous contrat bénéficieront de garanties exposées au paragraphe VIII (Garantis de prix).

**IV - MODIFICATIONS AUX INSTRUCTIONS FIGURANT SUR LA COMMANDE.** - Les modifications que l'acheteur désirerait voir apporter au libellé des commandes déjà enregistrées seront acceptées dans la mesure où elles parviendront en temps utile et seulement si elles concernent un changement de destination ou de conditionnement. Les modifications de commandes qui porteront sur le produit, le tonnage ou l'usine d'origine (pour les enlèvements camion) entraîneront l'annulation de la commande d'origine et la création d'une nouvelle commande à la date où la modification aura été portée à la connaissance de la S.D.A.C., avec les conséquences que cela comporte.

**V - DELAIS DE PAIEMENT.** - Les délais de paiement sont ceux fixés par les conditions générales de vente.

**VI - PAIEMENTS D'AVANCE.** - Les tonnages inclus dans le présent contrat pourront faire l'objet de paiement d'avance dans le cadre des conditions générales de vente.

**VII - TERME DU CONTRAT.** - Le présent contrat prendra fin le 31 mai 1972, que ces clauses aient, ou non, été respectées.

**VIII - AVANTAGES CONSENTIS A "L'ACHETEUR" SOUSSIGNE.** - Si l'acheteur se porte effectivement acquéreur, à + ou - 10 % près, de tonnage d'engrais azotés faisant l'objet du présent contrat entre le 1er juin 1971 et le 31 janvier 1972 et s'il se conforme aux clauses dudit contrat, il bénéficiera des avantages suivants :

a) **Prime de bonne exécution :** Une prime dite de "bonne exécution" de contrat de 1 % lui sera versée en fin de campagne sur le montant au hors taxe des achats d'engrais azotés qu'il aura effectués auprès du Vendeur sur tout l'exercice, c'est-à-dire entre le 1er juin 1971 et le 31 mai 1972, sous réserve que les tonnages achetés à partir du 1er février ne dépassent pas les tonnages sous contrat.

b) **Ristourne de tonnage :** Sous la même réserve que celle indiquée à la fin du paragraphe "a", il bénéficiera également en fin de campagne d'une ristourne de tonnage dont le taux et le montant seront déterminés en cumulant tous les tonnages d'engrais azotés qu'il aura achetés sur tout l'exercice.

• Echelle des ristournes de tonnages :		de 1.000 à 2.499 t.....	1,9 %
de 50 à 499 t.....	0,50 %	de 2.500 à 4.999 t.....	1,25 %
de 500 à 999 t.....	0,75 %	plus de 5.000 t.....	1,50 %

c) **Prime d'incitation :** Une prime dite "d'incitation" de 1 % sera déduite sur facture pour toutes les commandes transmises pour livraisons et disponibles dans le cadre du présent contrat et qui seront parvenues à la S.D.A.C. dans le courant du mois précédant chaque palier, c'est-à-dire en mai pour le premier palier et en septembre pour le 2ème palier.

Pour que les tonnages envoyés par camion en usine par les soins de l'acheteur bénéficient de cette prime, il faudra, en outre, que l'enlèvement ait été effectué dans les 3 premiers mois du palier considéré.

d) **Garantie de prix hors taxe :** Bénéficieront d'une part de la garantie de prix de palier, et, d'autre part, d'une garantie en cas de hausse de barème intervenant en cours de palier :

- pour le 1er palier, les commandes transmises et disponibles avant le 1er juin, ainsi que celles transmises postérieurement mais qui ont été acceptées et confirmées par le fournisseur qui s'est engagé à en effectuer la livraison sur ce palier.
- pour le 2ème palier, les commandes et disponibles transmises de 1er au 30 septembre, ainsi que celles transmises postérieurement mais qui ont été acceptées et confirmées par le fournisseur qui s'est engagé à en effectuer la livraison sur le deuxième palier.

Dans les deux cas et pour les commandes enlevées par camion acheteur, ces garanties ne joueront que pour les enlèvements effectués par avant les trois premiers mois de chaque palier.

e) **Garantie d'écarts :** Le Vendeur s'engage en outre à accorder la garantie d'écarts suivante à l'acheteur qui aura satisfait aux conditions du contrat.

Si au cours de la campagne 1971/72, dans une région où l'acheteur exerce son activité, le S.D.A.C. est amené à prendre, pour un engrais azoté déterminé, une mesure générale constituant une baisse par rapport au barème, le Vendeur s'engage à faire bénéficier rétroactivement de cette baisse 70 % des tonnages du produit considéré qu'il aura livré à l'acheteur depuis le 1er juin 1971 jusqu'à la date d'application de ladite mesure.

**CLAUSES GENERALES**

I - **DETERMINATION DU TONNAGE.** - Il sera tenu compte, pour déterminer si l'Acheteur a, ou non, rempli son contrat à plus ou moins 10 % près de tous les tonnages d'engrais azotés expédiés par le Vendeur à l'Acheteur entre le 1er Juin 1971 et le 31 Janvier 1972 à l'exception de ceux livrés en consignation.

II - **CLAUSE SUSPENSIVE.** - Tout retard dans le règlement intégral d'une facture à l'échéance prévue, même en cas de litige, pourra entraîner l'annulation pure et simple du présent contrat.

III - **CONTESTATIONS.** - Il est formellement convenu que toutes les contestations qui pourraient être soulevées à propos du présent contrat, seront de la compétence exclusive du Tribunal de Commerce de Paris, même en cas d'appel en garantie ou de pluralité de défendeurs, et ce, en l'absence, par dérogation aux dispositions des articles 59 et 181 du Code de procédure Civile.

Agence	Date
--------	------

Distributeur signataire	
-------------------------	--

2ème Agent	
------------	--

Contractant	
-------------	--

Retenus AZOTE	31
---------------	----

Acheteur à facturer	
---------------------	--

Tonnages contractés	Solides	Liquides
Produits en tonnes		
Produits en m <sup>3</sup>		

Produits	Premier palier				Deuxième palier				TOTAL
	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	
Nitrates de Chaux									
Ammonitrates B.B.M.									
Ammonitrates H.d.									
Solution Azotée									

FAIT en QUATRE EXEMPLAIRES

Le

L'Acheteur :

Enregistrement de la S.D.A.C. :

Le Vendeur :

IV - ECHELONNEMENT DES PRIX ( voir annexe )

Identique pour les engrais azotés et les complexes :

La campagne est divisée en 3 périodes de 4 mois :

- 1er palier : 1er JUIN - 30 SEPTEMBRE
- 2ème palier : 1er OCTOBRE - 31 JANVIER

Période d'utilisation : 1er FEVRIER - 31 MAI

L'écart total entre le début et la fin de la campagne est de 11,2 % se décomposant en :

8 majorations mensuelles de 0,75 % destinées à compenser le décalage de la date d'échéance.

2 majorations de 2,60 % appliquées à la fin de chaque palier.

V - ZONES DE PRIX

Les zones de prix sont supprimées.

VI - CONTRAT d'APPROVISIONNEMENT

Ce contrat, s'il est correctement rempli, assure les avantages suivants :

- Prime de bonne exécution de contrat de 1 %
- Ristourne de tonnage de 0,50 à 1,50 %
- Garantie d'écart limitée à 70 % du tonnage.

Toutefois, les tonnages livrés sur la 3ème période ne bénéficieront de la prime et de la ristourne qu'à concurrence d'un tonnage au plus égal au tonnage contracté.

Ces avantages sont complétés par :

- Prime d'incitation de 1 %
- et garantie de prix, accordées aux commandes sous contrat transmises dans les conditions définies aux a, c et d du contrat.

(c) Prime d'incitation :

Une prime dite " d'incitation " de 1 % sera déduite sur facture pour toutes les commandes transmises pour livraisons en disponible et qui seront parvenues à la SDAC dans le courant du mois précédant chaque palier, c'est-à-dire en Mai pour le premier palier et en Septembre pour le 2ème palier.

Pour que les tonnages enlevés par camion en usine par les soins de l'acheteur bénéficient de cette prime, il faudra en outre que l'enlèvement ait été effectué dans les 3 premiers mois du palier considéré.

(d) Garantie de prix hors-taxe :

Bénéficieront d'une part de la garantie de prix de palier, et d'autre part, d'une garantie en cas de hausse de barème intervenant au cours de palier :

\* Pour le premier palier, les commandes transmises en disponible avant le 1er Juin ainsi que celles transmises postérieurement mais qui ont été acceptées et confirmées par le fournisseur qui s'est engagé à en effectuer la livraison sur ce palier.

RELATION ENTRE LA PEDOLOGIE ET LES DIFFERENTES  
AUTRES SCIENCES (d'après EA. FITZ PATRICK, 1971)

