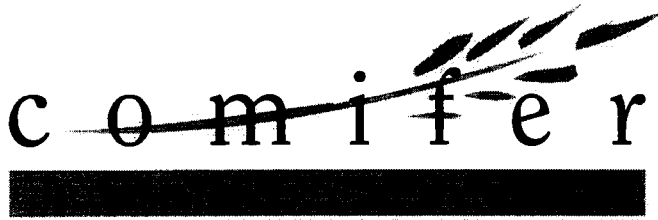




AIDE AU DIAGNOSTIC ET A LA PRESCRIPTION DE LA
FERTILISATION PHOSPHATÉE
ET POTASSIQUE
DES GRANDES CULTURES



Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée

AIDE AU DIAGNOSTIC ET A LA PRESCRIPTION DE LA
FERTILISATION PHOSPHATÉE
ET POTASSIQUE
DES GRANDES CULTURES

Document élaboré dans le cadre du groupe PK

Rédacteurs : P. CASTILLON (ITCF)
B. COLOMB (INRA)
J. DECROUX (Grande Paroisse - ATO)
M. DIAB (Laboratoire SAS)
JC. FARDEAU (CEA Cadarache)
F. LAURENT (ITCF)
J. MASSE (ITCF)
P. PLET (CRA Bretagne)
P. VILLEMIN (SCPA)

AVERTISSEMENT

Le raisonnement de la fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures proposé s'inscrit dans le contexte actuel où l'agriculteur, sous le poids des contraintes économiques, cherche à limiter les coûts de production et à privilégier la rentabilité immédiate : l'application des principes élaborés par le groupe de travail tente de concilier la maîtrise des coûts de production et la gestion de la fertilité phosphatée et potassique du milieu à moyen terme.

Cette démarche s'appuie d'une part sur les résultats d'essais longue durée mis en place dans les années 1975-1980 et d'autre part sur des travaux fondamentaux publiés récemment. Elle propose une organisation et une hiérarchisation des critères de raisonnement utilisables dans l'état actuel de nos connaissances. Elle doit être considérée comme un recueil organisé des principes de bases nécessaires à la réalisation d'un diagnostic permettant d'aboutir à des recommandations concernant les fertilisations phosphatées et potassiques.

Ces bases s'adressent aux différents acteurs impliqués dans la chaîne de conseils en fertilisation qui pourront ensuite les moduler en fonction des objectifs locaux de production et les mettre à disposition des utilisateurs finaux.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	3
1. BUT DE LA FERTILISATION	4
2. DYNAMIQUE DU PHOSPHORE ET DU POTASSIUM DANS LES SYSTEMES SOL-PLANTE	4
3. COMPORTEMENT DES CULTURES VIS-A-VIS DE LA FERTILISATION PHOSPHATEE ET POTASSIQUE	8
4. CARACTERISATION DE LA BIODISPONIBILITE	9
5. CONSEIL DE FUMURE : BASES DE PRESCRIPTION	17
6. MODALITES D'APPORTS DES ENGRAIS PHOSPHATES ET POTASSIQUES	18
7. CONTROLE DE LA FERTILISATION PRATIQUEE	23
8. BIBLIOGRAPHIE	27
ANNEXES	
Liste des essais longue durée	
Liste des laboratoires agréés	

AIDE AU DIAGNOSTIC ET A LA PRESCRIPTION DE LA FERTILISATION PHOSPHATEE ET POTASSIQUE DES GRANDES CULTURES

INTRODUCTION

Ce document rassemble et organise les bases actuelles d'aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures *. Il regroupe d'une part les modalités du raisonnement retenu et ses critères d'appréciation et d'autre part des valeurs seuils de jugement ainsi que des propositions de stratégies de fertilisation telles qu'elles peuvent être appréhendées à partir des données en notre possession (liste en annexe). Ces bases de raisonnement ont pour objectif de garantir une alimentation minérale (P et K) non limitante de la production ** des cultures concernées tout en évitant la surfertilisation (vis-à-vis du rendement) et en préservant la fertilité phosphatée et potassique du sol à moyen terme. Les préoccupations économiques sous tendent le raisonnement proposé : elles peuvent être intégrées lors de l'établissement de normes et de stratégies de fertilisation déclinées régionalement.

Seules les grandes cultures sont concernées : les prairies permanentes ainsi que les zones légumières exclusives ne sont pas prises en compte. Les cultures légumières incluses dans les assolements "grande culture" sont considérées dans cette étude et assimilées par la suite à des plantes exigeantes.

La démarche proposée s'adresse tout particulièrement aux différents acteurs suivants.

■ Les enseignants des différents établissements agricoles auront à leur disposition les bases de raisonnement rénovées compte tenu des avancées récentes de la recherche.

■ Les laboratoires d'analyses trouveront les différents éléments permettant d'asseoir leur expertise et d'accompagner leur prestation vers l'utilisateur final en fonction des objectifs de ce dernier.

* Liste des cultures étudiées : blé tendre et dur, avoine, orge, maïs grain, maïs ensilage, tournesol, colza, pois, soja, sorgho, luzerne, pomme de terre, betterave, ray-grass, prairies temporaires.

** Pour la betterave et la pomme de terre, on entend par production le rendement en sucre ou en fécule.

■ Les prescripteurs devront élaborer des conseils ou des outils de conseil performants en les adaptant au contexte local ou en les utilisant avec des références acquises régionalement et qui n'auraient pas été intégrées dans ce travail.

■ Les distributeurs trouveront les bases de construction d'un outil de gestion permettant de mieux planifier le marché.

■ Enfin le gestionnaire de l'espace, préoccupé par les problèmes d'environnement, aura à sa disposition certaines bases de raisonnement permettant, dans une première approche, de concilier agriculture rentable et prévention des pollutions.

L'ensemble de la démarche est basé sur les différents travaux réalisés et synthétisés ces dernières années et qui n'avaient pas jusqu'à présent fait l'objet d'une organisation hiérarchisée. Il est clair que des événements nouveaux sont susceptibles de faire évoluer une telle organisation et les préconisations qui en découlent, parmi lesquelles on peut citer :

- le développement de méthodes ou procédés d'analyse de terre rendant mieux compte de la biodisponibilité ;

- le bouleversement des assolements et l'introduction de nouvelles cultures ;

- le développement de nouvelles méthodes de diagnostic des états nutritionnels des cultures ;

- la mise sur le marché d'espèces et/ou variétés ayant de meilleures capacités d'extraction des éléments minéraux ;

- l'apparition de nouvelles contraintes réglementaires ou environnementales.

Cette "aide au diagnostic et à la prescription" n'est donc pas une démarche figée mais une étape à partir de laquelle il faudra évoluer en intégrant les connaissances ou les contraintes nouvelles.

Différents termes utilisés dans ce document sont définis et référencés dans le glossaire de la fertilisation NPK édité par le COMIFER.

1. BUT DE LA FERTILISATION

L'objectif de la fertilisation ¹ est de satisfaire les besoins ² nutritionnels des plantes en complétant l'offre du sol en éléments minéraux dans des conditions économiquement rentables. La fertilisation doit tenir compte :

- des objectifs de rendement ³ et de qualité des différentes cultures
- de la biodisponibilité ⁴ des éléments du milieu
- du maintien du potentiel de production
- de la variabilité spatiale et temporelle du milieu
- de la préservation de l'environnement.

Cette définition appelle deux remarques :

- On recherchera moins que par le passé à atteindre un niveau de teneur analytique ⁵ d'un élément dans un sol donné jugé par l'analyse de terre.
- La notion de qualité sera très importante pour certaines cultures hors du champ d'activité traité dans ce document (compte tenu des cultures concernées).

2. DYNAMIQUE DU PHOSPHORE ET DU POTASSIUM DANS LES SYSTEMES SOL-PLANTE

L'objectif de ce chapitre est de décrire et de formaliser de manière concise des faits établis avec certitude en l'état actuel de nos connaissances et susceptibles d'avoir des conséquences sur les pratiques de fertilisation phosphatée et potassique des cultures. C'est pourquoi la dynamique des formes de P et de K présentes dans les sols à l'état biodisponible fait l'objet essentiel de cette présentation.

- ¹ **Fertilisation** : Ensemble de techniques agricoles mettant en oeuvre des matières fertilisantes.
- ² **Besoins** : Quantité d'élément nutritif prélevée par une culture nécessaire et suffisante pour atteindre un objectif de rendement.
- ³ **Objectif de rendement** : Rendement fixé par avance en fonction des aptitudes culturales du milieu, de l'espèce, de la variété, du système de culture et des objectifs de l'agriculteur. Cet objectif peut être estimé à partir des fréquences des rendements obtenus les années précédentes dans la même parcelle.
- ⁴ **Biodisponibilité** : Caractéristique d'une espèce chimique présente dans le sol lui conférant la possibilité d'être absorbée par une culture.
- ⁵ **Teneur analytique** : Quantité d'élément extractible, par unité de masse de terre, déterminée sur un échantillon par une méthode analytique donnée.

2.1 Conditions générales de nutrition phosphatée et potassique des cultures avec ou sans apport d'engrais

- Le prélèvement ⁶ de phosphore et de potassium par les racines des plantes n'a lieu que sous forme d'ions orthophosphate ou potassium, que les racines soient ou non mycorhizées dans le cas du phosphore.
- Le coefficient réel d'utilisation ⁷ du P et du K des engrais ⁸ phosphatés et potassiques, durant l'année qui suit l'apport, est toujours compris dans les conditions actuelles des pratiques agricoles entre 0 % et 20 % pour P et 15 % à 30 % pour K. Il en résulte que, dans les situations où les quantités apportées sont très proches des quantités prélevées par les cultures, la participation des engrais à la satisfaction des besoins des cultures ne représente jamais plus 30 % du prélèvement. Cette valeur est légèrement supérieure lorsque les quantités apportées sont significativement supérieures à celles prélevées.

Ces faits ont pour origine l'intense compétition existant entre le sol et la plante pour les ions phosphate et potassium. Lorsque ces ions sont ajoutés à un sol pour jouer le rôle d'engrais, ils réagissent avec des constituants du sol (oxyhydroxydes de fer et d'aluminium et carbonates pour le phosphate, argiles minéralogiques pour le potassium) et une partie d'entre eux perd tout ou partie de ses possibilités de déplacement vers les plantes. Cette propriété des sols correspond, selon les situations, à la notion de pouvoir fixateur ⁹ ou de

- ⁶ **Prélèvement** : Quantité d'élément nutritif présente dans cette culture à un stade végétatif, ou à une date, donnés et rapportée à l'unité de surface (généralement l'hectare)..
- ⁷ **Coefficient réel d'utilisation d'un élément nutritif (CRU)** : Fraction de l'apport d'un élément nutritif prélevée par une culture. Ce coefficient ne peut être apprécié que si l'élément nutritif est marqué : il est calculé à partir de la qualité d'élément nutritif marqué retrouvé dans une culture fertilisée par une matière fertilisante dont l'excès isotopique est connu. Il peut être calculé sur une seule culture ou sur une succession de cultures.
- ⁸ **Engrais** : Matières fertilisantes dont la fonction principale est d'apporter aux plantes un (des) élément(s) directement utile(s) à leur nutrition ; la teneur en élément(s) nutritif(s) est au moins égale à 3 % en masse pour l'un des trois éléments nutritifs majeurs (azote, phosphore, potassium) et doit être conforme à la réglementation en vigueur. La législation française distingue différents types d'engrais suivant leur forme chimique ou physique et leur nature minérale ou organique.
- ⁹ **Pouvoir fixateur** : Aptitude de certains constituants du sol à transformer des formes du potassium ou du phosphore mobiles en formes moins mobiles. Il est apprécié par différentes méthodes analytiques : méthodes des ajouts de l'élément concerné sous forme soluble dans l'eau ou méthode isotopique.

pouvoir tampon ¹⁰. Elle a deux conséquences pratiques :

- plus le temps de contact entre un engrais et une terre sera long plus son coefficient réel d'utilisation par la culture qui suit l'apport sera faible, et ce plus particulièrement pour les phosphates. Cette situation justifie que la **période "vieillessement"** des engrais précédemment enfouis dans le sol puisse être utilisée comme critère à prendre en considération dans les conseils de fumure ;

- dans les situations où les apports sont significativement supérieurs aux exportations ¹¹ dues aux récoltes, le pouvoir fixateur influence les possibilités de constitution des réserves biodisponibles. C'est pourquoi les critères "**pouvoir fixateur**" et "**passé de la fertilisation**" sont également des données susceptibles d'améliorer le raisonnement des fertilisations P et K.

■ Ainsi, avec ou sans apport d'engrais P et/ou K, 70 % à 80 % du phosphore ou du potassium présent dans une culture ont pour origine la réserve des éléments P et K présents à l'état biodisponible dans le sol. La réserve d'éléments biodisponibles joue donc quantitativement le rôle principal dans la nutrition P et K des cultures.

■ Peut-être faut-il rappeler à ce stade que des apports d'engrais phosphatés et potassiques ne permettront d'accroître significativement les rendements des cultures en modifiant leur nutrition P et K que si, et seulement si, la nutrition à partir des réserves et/ou les conditions de leur exploitation par le végétal est le premier des facteurs limitants de la production végétale.

C'est aussi signifier que les conditions d'utilisation des réserves biodisponibles par les racines des plantes peuvent avoir dans certaines circonstances une influence sur la nutrition P et K supérieure à celle du niveau des réserves.

2.2 Organisation et estimation des réserves de P et de K biodisponibles pour les cultures

■ Les éléments P et K étant prélevés sous forme d'ions, ceux-ci ne peuvent exister que dans la solution du sol. Or celle-ci ne contient, à un instant donné, que quelques % des quantités du P et du K effectivement prélevés pendant la période culturale.

¹⁰ **Pouvoir tampon** : Propriété que possèdent certains constituants d'un sol à s'opposer à une variation de concentration de potassium et/ou de phosphore dans la solution du sol, ayant pour origine un apport d'élément fertilisant ou un prélèvement par des cultures.

¹¹ **Exportation** : Quantité d'élément contenue dans les produits végétaux sortis de la parcelle.

La quasi totalité des besoins est donc libérée durant la phase de croissance du végétal à partir de la phase solide du sol.

■ Les éléments P et K présents à l'état biodisponible dans le sol ne sont pas un ensemble unique et homogène. Ils se trouvent dans des systèmes complexes à plusieurs "compartiments" dont les possibilités de transfert vers la phase liquide sont très variables : la durée nécessaire pour qu'ils rejoignent la solution s'étale d'une durée quasi nulle à un temps infini à l'échelle de la pratique agricole. La taille et les propriétés des différents compartiments ne peuvent pas être déduites des critères pédologiques habituellement utilisés ; elles ne peuvent être connues que par des déterminations directes.

■ Une description élaborée des éléments P et K biodisponibles nécessite d'avoir accès à trois paramètres expérimentaux permettant de caractériser trois facteurs : le facteur "**intensité**" qui traduit la pression des ions phosphate et potassium sur les racines, le facteur "**quantité**" qui illustre la quantité d'ions susceptibles de quitter la phase solide pour rejoindre la solution pendant une période donnée et le facteur "**capacité**" qui rend compte de l'aptitude du sol à maintenir constante le facteur intensité lorsque le facteur quantité sera modifié par un apport ou par un prélèvement.

L'analyse de sol d'origines variées permet de constater que ces trois facteurs sont statistiquement indépendants. Par contre, dans un sol donné, ces trois paramètres sont en général statistiquement liés et interdépendants. Ainsi lorsque le facteur intensité, apprécié au moyen de la concentration des ions phosphate dans la solution du sol, croît, le facteur quantité croît et le facteur capacité, apprécié au moyen d'un paramètre caractérisant le pouvoir fixateur ou le pouvoir tampon, diminue. C'est pourquoi la détermination de l'évolution de l'un d'entre eux, soit au cours du temps soit sous l'influence de différents traitements, peut être considérée comme suffisante pour saisir le sens de l'évolution du statut des éléments biodisponibles P et K. En conséquence, il est en général plus facile de saisir ce sens de variation du potentiel alimentaire au sein d'une parcelle que de comparer, et surtout de quantifier de manière absolue, le pouvoir alimentaire de sols prélevés dans des parcelles différentes.

■ L'estimation du pouvoir alimentaire P et K des sols est cependant réalisée régulièrement à l'occasion de la pratique des analyses dites de routine. Ces analyses, on le rappelle, consistent à extraire du sol, au moyen de réactifs plus ou moins conventionnels utilisés de manière standardisée, une quantité de phosphore ou de potassium : elles ne peuvent donc donner accès qu'au facteur quantité, ou à un paramètre qui lui est proportionnel. Il existe de nombreuses techniques d'extraction pour P : il s'agit, en France, des méthodes Dyer, Joret-Hébert, Olsen, Bray I ; une seule utilisant un échange d'ions est

pratiquée en France pour K. Le réactif idéal serait tel que les quantités qu'il extrairait seraient significativement corrélées aux quantités prélevées par les cultures, ou mieux encore à leur rendement, du moins tant que les quantités d'éléments biodisponibles sont le facteur limitant de la production. Il n'existe pas de réactif parfait mais certains sont cependant mieux adaptés que d'autres à l'extraction effective du phosphore biodisponible (4, 5, 8, 9, 11).

■ L'utilisation de méthodes imparfaites peut aboutir à des contradictions entre les résultats analytiques obtenus au moyen de la méthode choisie et supposée utilisable dans le contexte pédologique local, et les observations et résultats agronomiques. Dans ces circonstances il importe alors de chercher à caractériser le facteur "intensité" en déterminant la concentration des ions phosphate ou potassium dans la solution du sol et le facteur capacité en appréciant le pouvoir fixateur par une technique adaptée à chacun des éléments. Cette démarche permet en général de constater qu'un de ces paramètres peut être le facteur limitant réel, même si le facteur quantité est à son optimum.

2.3 Evolution des réserves biodisponibles sous l'influence des prélèvements des cultures et des apports

■ Les prélèvements d'éléments P et K par les cultures se traduisent inéluctablement par une diminution du compartiment de P et K le plus biodisponible, et par voie de conséquence, du potentiel alimentaire du sol.

■ A l'inverse, des apports de P et K pratiqués sous forme biodisponible (engrais phosphatés apportés sous forme soluble eau ou citrate d'ammonium neutre par exemple) et significativement supérieurs aux exportations dues aux récoltes entraîneront un accroissement de la quantité des réserves biodisponibles et de leur biodisponibilité. Mais en toutes circonstances et en raison de l'existence du pouvoir fixateur et/ou du pouvoir tampon, lorsque des engrais P et K sont ajoutés à une terre, la majeure partie de l'apport quitte la phase liquide pour rejoindre la phase solide et à l'intérieur de celle-ci les différents compartiments pour lesquels la vitesse de retour vers la phase liquide est inférieure à la vitesse d'entrée.

■ Une restitution pratiquée sous forme biodisponible en quantité très proche de celle due aux exportations peut selon le passé de fertilisation conduire soit à un maintien soit à une lente diminution du niveau de biodisponibilité. Cette dernière situation est observable lorsque des apports très supérieurs aux exportations avaient eu lieu

préalablement à l'établissement d'une politique de stricte restitution des exportations.

■ Dans le cas des engrais phosphatés, l'accroissement des réserves observé après un apport effectué sous forme soluble-eau ou citrate d'ammonium neutre est toujours supérieur ou égal à celui observé avec des formes solubles dans les autres réactifs conventionnels. Cette différence de comportement entre formes soluble-eau ou citrate d'ammonium neutre et formes insolubles dans ces réactifs s'explique par une solubilité, aux pH des sols, des premières formes très supérieure à celle des phosphates du sol et une solubilité des secondes formes très voisine, voire inférieure, à celle des phosphates des sols. De telles situations n'existent pas dans le cas du potassium, tous les engrais potassiques commercialisés en France étant beaucoup plus solubles que le potassium présent dans le sol à l'état naturel ou enfoui de longue date.

L'ensemble de ces observations illustre l'intérêt que peut présenter la connaissance du "**passé de fertilisation**" d'une parcelle pour proposer une fertilisation raisonnée.

2.4 Conditions édaphiques et écophysologiques d'exploitation des réserves susceptibles de modifier les quantités transférées du sol vers les cultures

■ Les quantités de P et de K prélevées en un temps donné par une racine sont proportionnelles à la concentration des ions aux abords de la zone active de la racine. Ce fait suffit à justifier l'intérêt de la granulation des engrais soluble-eau pour P et pour K et soluble-citrate d'ammonium neutre pour les phosphates puisque la granulation permet d'obtenir autour du granule des concentrations 10 fois à 100 fois plus élevées que celles qui seraient obtenues en pratiquant une répartition homogène de l'apport dans l'ensemble du sol.

■ En conditions de plein champ les racines n'exploitent que de 20 % à 10 % du volume de l'horizon labouré. Même sous l'effet des prélèvements par les racines des plantes, les éléments P et K à l'état ionique ne diffusent que sur de très courtes distances (notamment le P) vers la zone d'absorption¹² racinaire. Pour que la nutrition phosphatée ou potassique ne soit pas facteur limitant de la production, la concomitance de ces deux faits impose donc :

- soit qu'en chaque zone de sol la racine puisse disposer de quantités de P et de K biodisponibles 5 à

¹² **Absorption** : Mécanisme par lequel la plante prélève les éléments nutritifs.

10 fois supérieures à ce qu'elles pourraient être si l'exploitation racinaire était totale ;

- soit que les racines progressent et se développent dans le sol pour que les transferts de phosphore et de potassium biodisponibles dans les plantes puissent se poursuivre dans le temps.

La première condition est désormais économiquement irréalisable. Par contre elle peut l'être localement à l'issue d'utilisation de formes soluble-eau apportées au voisinage des racines sous forme granulée, mais ne pourra pas être atteinte avec des formes insoluble-eau, même non granulées. Seule la seconde condition est accessible à l'agriculteur. Elle illustre que la nature du système racinaire et sa sensibilité aux conditions de préparation physique du sol pourront jouer un rôle déterminant et permet de rendre compte de l'existence de plantes susceptibles d'être **exigeantes** et de plantes susceptibles d'être **peu exigeantes** ¹³.

■ Les possibilités de transfert des ions P et K dépendent de la présence d'un film d'eau permanent entre la racine et les particules de terre, même lorsque le flux de transpiration est proche de zéro. La gestion raisonnée de l'eau apparaît donc comme un des facteurs déterminants de l'utilisation raisonnée des engrais phosphatés et potassiques par les racines.

2.5 Influence du devenir des résidus culturaux sur la biodisponibilité de P et K dans le sol et sur les niveaux de fertilisation

Les résidus de cultures constitués de tiges et feuilles abandonnées sur le sol après la récolte contiennent généralement l'essentiel du potassium prélevé par les plantes mais peu de phosphore à quelques exceptions près comme la betterave et le soja.

Il est admis que le potassium contenu dans les tissus végétaux est en quasi totalité présent sous une forme soluble. Il est de ce fait très rapidement libéré sur le sol par les pluies qui "lavent" les tissus nécrosés et s'y comporte de façon identique à celle du potassium apporté par les engrais. En conséquence, chaque fois que les résidus de récolte sont enfouis dans le sol ils sont à considérer comme la première fertilisation potassique pour la culture qui suivra. L'engrais apporté avant l'implantation de celle-ci en sera le complément dont l'importance dépendra :

- de la quantité de K restitué par les résidus

¹³ **Culture exigeante** : Culture ayant une faible capacité à extraire du sol les quantités d'élément nutritif nécessaires à la satisfaction de son besoin, pour laquelle on peut donc observer une réponse, même dans des terres dont les teneurs analytiques sont supérieures à la teneur seuil Timpassé.

- du délai entre la récolte du précédent et la culture qui suit
- de la biodisponibilité du K dans le sol.

Les cultures "sans résidus" comme les prairies de fauche, le maïs ensilé ou les céréales dont les pailles sont enlevées, abaissent de manière sensible la biodisponibilité du potassium dans le sol du fait qu'après en avoir prélevé de grandes quantités elles n'en restituent que très peu. Après de tels précédents, les expérimentations montrent que l'impasse sur la fertilisation potassique peut être plus risquée ; dans ces cas les doses d'engrais garantissant une alimentation non limitante de la culture suivante doivent souvent être majorées par rapport aux situations avec restitution des résidus.

C'est donc autant les quantités exportées par la culture précédente que ce que va exporter la culture que l'on veut fertiliser qui détermine le niveau de la dose de potassium à appliquer.

Contrairement au potassium, le phosphore des végétaux est présent pour moitié environ sous forme organique et requiert d'être minéralisé dans le sol pour que les plantes puissent de nouveau le prélever. Certes la minéralisation est un processus relativement lent qui présente l'inconvénient de ne délivrer que de manière parcimonieuse les ions phosphates d'origine organique, mais il les protège en même temps de la fixation ¹⁴ sur les constituants minéraux du sol. Ceci explique que les CRU du phosphore des résidus végétaux soient apparus au moins équivalents à ceux des engrais solubles dans l'eau.

Si l'on considère en outre l'effet propre des matières organiques qui peuvent parfois accroître la biodisponibilité du P dans le sol, on peut logiquement admettre que le phosphore des résidus de récolte à la même efficacité agronomique que celui des engrais minéraux solubles dans l'eau. La différence avec le potassium réside donc dans les quantités mises en jeu qui sont généralement beaucoup plus faibles.

Ces quelques considérations sur l'efficacité agronomique du P et K des résidus végétaux nous renvoient au problème actuel de la jachère dont il faut distinguer les deux modes principaux. Une jachère nue, qui tout naturellement ne recevra pas d'engrais, peut être assimilée à une durée équivalente de vieillissement. Une jachère couverte peut à l'inverse être considérée au moment de sa destruction comme une restitution dont l'importance sera fonction des quantités de P et K prélevées par les plantes puis restituées au sol.

¹⁴ **Fixation** : Ensemble de phénomènes physiques et chimiques plus ou moins réversibles pouvant conduire, à une diminution de la biodisponibilité des éléments nutritifs.

CONCLUSION

En résumé, la nutrition phosphatée et potassique des plantes dépend :

- des fertilisations appliquées, de leur nature et des conditions de leur application, du pouvoir fixateur du sol et du bilan entrée-sortie ;
- de l'importance quantitative de la réserve biodisponible présente dans le sol mais aussi de son aptitude à alimenter les plantes et de la capacité du sol à maintenir constante cette aptitude ;
- du type de plantes ;
- des conditions faites aux racines des plantes pour accéder aux engrais et à la réserve biodisponible (état structural du sol par exemple).

Seule la réalisation optimale de toutes ces conditions peut permettre de pratiquer un raisonnement sûr des fertilisations phosphatée et potassique garantissant d'une nutrition satisfaisante et d'une gestion économe des intrants.

3. COMPORTEMENT DES CULTURES VIS-A-VIS DE LA FERTILISATION PHOSPHATÉE ET POTASSIQUE

Le comportement différent des espèces cultivées vis-à-vis des fertilisations phosphatée et potassique a été signalé depuis longtemps. BONIFACE et BOSC le rappelaient à nouveau avec insistance dans leur synthèse des essais de longue durée de l'INRA (4, 5).

Ce fait apparaît de manière évidente dans certains essais de plein champ et tout particulièrement en l'absence continue d'apport d'engrais. Il se manifeste par des pertes de production très différentes d'une espèce à l'autre **qui traduisent donc leur sensibilité à une alimentation déficiente** ou encore leur niveau d'exigence d'un apport d'engrais pour assurer une alimentation non limitante. L'expérimentation au champ a également montré que, pour un niveau de biodisponibilité donné de l'élément dans le sol, la dose d'engrais nécessaire pour assurer une alimentation non limitante, du point de vue du rendement, était plus élevée pour certaines espèces que pour d'autres.

Cette caractéristique des espèces apparaît actuellement comme le premier critère à prendre en considération. Cependant, pour l'intégrer dans un schéma de raisonnement, il faut au préalable en proposer des éléments de quantification qui permettent d'établir une hiérarchie parmi les principales espèces cultivées et qui constituent de bons paramètres pour moduler les choix techniques.

Les expérimentations de longue durée réalisées en France ont permis d'établir le classement des espèces les mieux représentées. **Les pertes de production associées à l'impasse continue sur la fertilisation P ou K ont été le critère retenu pour effectuer ce classement.**

$$\text{Pertes de production} = \frac{R_{max} - R_0}{R_{max}} \times 100$$

R_{max} : production maximale obtenue avec l'un des régimes P1, P2, P3 ou K1, K2, K3 correspondant à des doses croissantes de P_2O_5 ou K_2O

R_0 : production du régime P_0 ou K_0 (sans apport).

L'exigence de chaque espèce a ainsi été appréciée par le niveau moyen des pertes de production et la nature de leur distribution calculés pour l'ensemble des données disponibles.

Une telle démarche n'est certes pas exempte de critiques. On pourrait tout d'abord lui objecter le fait d'avoir confondu dans une même statistique les différentes années d'expérimentation d'un même

essai, c'est-à-dire des parcelles plus ou moins appauvries en fonction de la durée de l'essai. Le biais qui pourrait en découler n'est en réalité que de peu d'importance, car à l'exception de quelques essais on n'observe (à l'examen des données disponibles) ni pour P, ni pour K, aucune tendance à l'accroissement des pertes de production avec l'appauvrissement des sols. De plus la présence des espèces se distribue de façon à peu près aléatoire dans la durée des essais.

Le biais le plus important est dû à l'interaction lieu-espèce ou espèce-succession culturale. C'est ainsi que la betterave est totalement absente des essais du Sud de la France et inversement pour le sorgho. De même, pour la fertilisation potassique les précédents prairies ou betterave influencent fortement la réponse des cultures en l'absence de fertilisation.

Fondée sur une telle approche, trois groupes d'exigences ont pu être définis.

	P ₂ O ₅	K ₂ O
Exigence élevée	Betterave, colza, luzerne, pomme de terre	Betterave, pomme de terre
Exigence moyenne	Blé dur, maïs ensilage, orge, pois, ray-grass, sorgho	Colza, luzerne, maïs ensilage, maïs grain, pois, ray-grass, soja, tournesol
Exigence faible	Avoine, blé tendre, maïs grain, soja, tournesol	Avoine, blé dur, sorgho, blé tendre, orge, sorgho

Ce tableau ne présente que les cultures pour lesquelles il existe des références expérimentales. Il est le résultat de l'analyse des essais longue durée dont la liste figure en annexe 2.

Par défaut :

- les cultures légumières situées en rotation de grandes cultures sont assimilées à des cultures exigeantes ;
- les cultures, pour lesquelles il n'existe pas actuellement de référence expérimentale, seront assimilées à des cultures d'exigence moyenne.

Remarque importante :

Ce classement est représentatif d'un comportement moyen et les conditions de culture (itinéraire technique, état structural du sol, contraintes climatiques) sont susceptibles d'entraîner quelques modifications de hiérarchie : à ce titre, le blé sur blé peut être considéré comme une culture moyennement exigeante pour le phosphore.

4. CARACTERISATION DE LA BIODISPONIBILITE

Les choix techniques concernant la fertilisation phosphatée et potassique d'une culture nécessitent que soit appréciée la biodisponibilité du phosphore et du potassium dans le sol. On entend par biodisponible toute espèce chimique présente dans le sol qui peut être absorbée par le végétal (d'après (6)). Autrement dit, on peut admettre que la réserve biodisponible est constituée de "l'ensemble des ions phosphate et potassium présents dans le sol et susceptibles de rejoindre la solution du sol en un temps compatible avec la durée de l'activité racinaire" (10).

L'approche la plus universelle et la plus ancienne consiste à quantifier cette "réserve" biodisponible par des outils analytiques : c'est le domaine de l'**analyse de terre** dont la portée et le domaine de validité ont été reprecisés au chapitre 2.

A la lumière des résultats récents concernant la dynamique de ces éléments dans le sol, il semble indispensable de compléter ce premier niveau d'information par deux facteurs liés à la pratique culturale : le devenir des **résidus de la culture** qui précède celle sur laquelle on doit établir la prescription de fumure et le **passé récent de fertilisation**.

Ainsi la caractérisation de la biodisponibilité reposera sur la prise en compte simultanée de ces trois indicateurs : ceux-ci seront détaillés dans les trois paragraphes suivants avant d'être "combinés" avec le critère "exigence" dans un tableau diagnostique général (tableaux 5 et 6).

Avant d'entrer dans le détail des critères proposés, il est nécessaire de décrire la démarche générale (diagramme 1) aboutissant au conseil de dose.

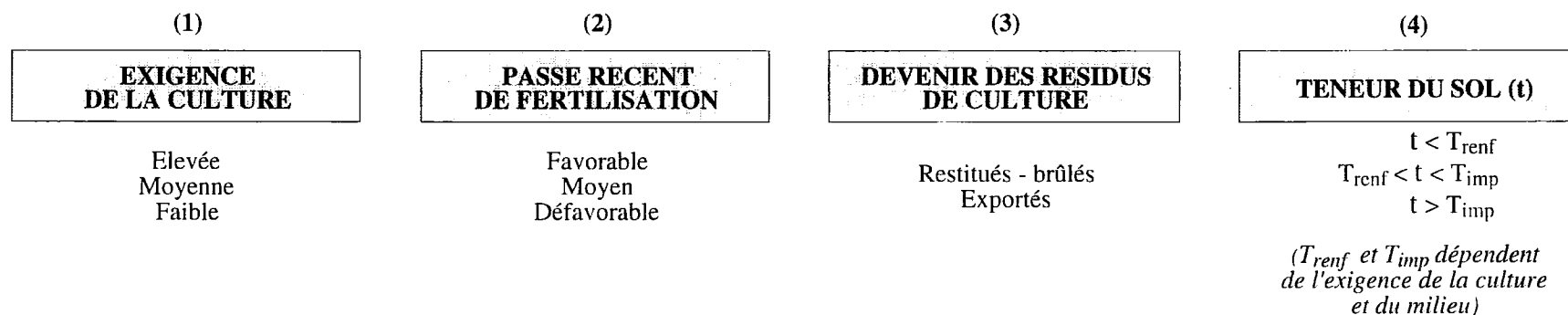
La prise en compte des trois critères évoqués plus haut amène à un diagnostic global de biodisponibilité de l'élément dans le sol : on propose de retenir **trois classes** de ce facteur. Ces trois classes aboutissent à trois **stratégies de fertilisation distinctes (S₁, S₂, S₃)**.

S₃ : Une classe où le niveau de biodisponibilité dans le milieu est suffisante pour permettre une politique d'impasse ¹⁵ dans des conditions bien délimitées sur lesquelles nous reviendrons.

S₂ : Une classe de biodisponibilité qui permet de baser le conseil sur un niveau de fumure moyen dit

¹⁵ **Impasse** : Absence de fumure durant une ou plusieurs années, aboutissant sur la période considérée à un bilan (F-E) négatif.

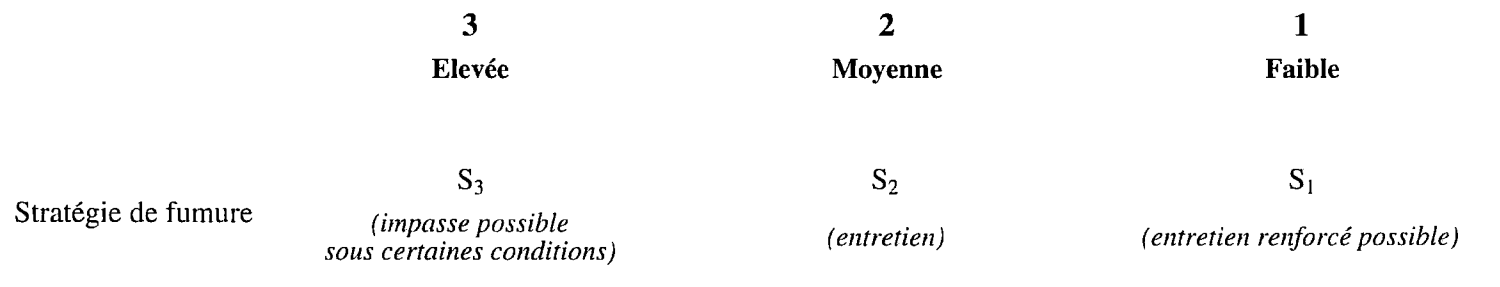
① QUATRE CRITERES A DIAGNOSTIQUER



② COMBINER (1) + (2) + (3) + (4)

BIODISPONIBILITE

10



③

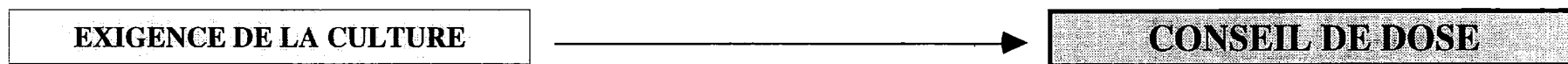


Diagramme 1 - Démarche générale de diagnostic et prescription du niveau de fertilisation

"d'entretien" ¹⁶ suffisant pour :

- permettre la stricte satisfaction des besoins de la culture
- maintenir la biodisponibilité du P et du K.

S₁ : Enfin une classe de faible biodisponibilité qui interdit toute suppression de fumure même temporaire et qui de plus nécessitera la mise en oeuvre d'une fumure parfois supérieure à celle proposée au paragraphe précédent.

On se reportera au chapitre **5** pour les modalités pratiques de calcul de ces trois stratégies de fumure.

4.1 Critères à prendre en compte

4.1.1 L'analyse de terre

Cet outil fournit un indicateur d'une quantité extractible ¹⁷ dite "assimilable" dans le cas du phosphore ou "échangeable" dans le cas du potassium, en référence aux modalités d'extraction utilisées pour chacun d'eux.

4.1.1.1 Méthodes et domaines de validité

■ Pour le phosphore

Une analyse de routine consiste à extraire du sol une fraction du phosphore au moyen d'un réactif plus ou moins conventionnel. La quantité ainsi extraite est fréquemment dénommée "phosphore assimilable", alors qu'il ne s'agit que du phosphore extrait du sol par un réactif chimique et non par un végétal. Une telle démarche, qui procure un seul paramètre expérimental, ne peut permettre de caractériser le phosphore biodisponible que par son facteur quantité. Les méthodes d'extraction sont multiples : aucune n'est universelle, mais certaines sont cependant mieux adaptées que d'autres à l'estimation du facteur quantité (8). De manière schématique il apparaît que les meilleures méthodes d'extraction sont les moins agressives à l'égard du sol ; mais elles sont aussi celles qui extraient les quantités de phosphore les plus faibles et par voie de conséquence les plus difficiles à déterminer avec précision.

Toutefois les méthodes actuelles reflètent bien le régime de fertilisation appliquée dans la durée.

¹⁶ Fumure d'entretien :

- Classiquement, fumure phosphatée ou potassique appliquée en vue de maintenir la teneur analytique du sol à un niveau jugé satisfaisant dans une succession culturale donnée.
- Actuellement et par convention, on continue d'appeler "fumure d'entretien" la fumure appliquée dans les situations où la biodisponibilité du phosphore ou du potassium est jugée correcte.

¹⁷ Élément extractible : Élément nutritif du sol dont la teneur est estimée à partir d'une méthode analytique.

Si l'on se réfère aux méthodes actuellement utilisées en France, il est important de noter les situations où l'utilisation d'un extractif donné peut poser problème. Ainsi :

- DYER donne des résultats entachés d'erreur dans des situations où il y a eu apports de phosphates tricalciques (phosphates naturels) ;
- JORET-HEBERT est également sensible mais dans une moindre mesure à cette surestimation du P biodisponible dans le cas d'une fertilisation à base de phosphates naturels ;
- OLSEN peut poser problèmes dans les sols à pH faible (pH eau \leq 6).

Dans le cas d'apports de matières organiques de type boues d'épuration, les méthodes Joret-Hébert et Dyer ont tendance à surestimer le phosphore disponible. Cette surestimation est plus forte pour Dyer.

Toutes ces méthodes donnent des informations erronées dans les andosols.

Remarque :

Les méthodes faisant appel à des mesures biologiques (détermination de l'ATP, des phosphatases, de la biomasse microbienne) donnent des résultats non corrélés au phosphore biodisponible tel qu'on l'a défini.

Avant toute considération, il est donc important de vérifier que l'extractif utilisé l'a été dans son domaine de validité.

■ Pour le potassium

Le réactif utilisé pour extraire le K échangeable (acétate d'ammonium) ne pose pas de problème particulier dans l'ensemble des situations françaises.

4.1.1.2 Interprétation

La pertinence de l'interprétation sera liée à la qualité du référentiel agronomique nécessaire à l'établissement des normes d'interprétation.

L'interprétation d'une teneur analytique dépend du modèle général de raisonnement adopté : le diagnostic sera basé sur la comparaison de la valeur mesurée à un jeu de valeurs "remarquables" ou "normes" ¹⁸ qui, compte tenu des trois domaines de

¹⁸ Norme d'interprétation : Ensemble de teneurs analytiques établies expérimentalement pour un type de sol et une région donnés, permettant de diagnostiquer la biodisponibilité des éléments nutritifs du sol.

Les seules caractéristiques analytiques de l'échantillon de terre analysé sont en général insuffisantes pour l'établissement de ces normes. Elles dépendent du type de sol ainsi que du climat, des espèces cultivées, des techniques culturales (formes d'engrais, ...), du niveau d'intensification, ...

disponibilité 1, 2, 3 du tableau 1, sont des valeurs seuils qui doivent répondre aux deux questions suivantes :

■ Quelle est la teneur analytique minimale admissible pour un type de sol et une culture donnés telle qu'une impasse annuelle n'entraîne pas de diminution significative de rendement de la culture considérée ?

Nous appellerons cette valeur T_{imp} (pour "impasse").

■ Quelle est la teneur maximale en dessous de laquelle, pour un milieu et une culture donnés, il est nécessaire pour satisfaire les besoins de celle-ci d'apporter une quantité d'élément fertilisant supérieure à la dose dite d'entretien ?

Nous appellerons cette teneur T_{renf} (pour "renforcé").

Ainsi, les deux valeurs proposées, T_{renf} , T_{imp} , définissent trois domaines justifiables des trois stratégies S_3 , S_2 , S_1 précédemment évoquées. En fait, ces trois classes seront définies en prenant en compte deux critères supplémentaires : devenir des résidus de culture et passé de fertilisation (voir tableaux 5 et 6).

4.1.1.3 Elaboration des normes d'interprétation : méthodologie proposée

■ Le jeu de valeurs normatives T_{renf} , T_{imp} devra être proposé par type de milieu jugé homogène vis-à-vis :

- *De la dynamique de P et K dans le sol.* Ceci suppose une caractérisation de ces milieux à l'aide de critères descriptifs : PLET et RUELLAN (18) ont proposé une telle démarche, qui n'a, pour l'instant, fait l'objet que d'une validation partielle (14) mais qui devrait être considérée comme un exemple à portée méthodologique.

- *Des systèmes de culture pratiqués.* Les critères de caractérisation précédemment évoqués sont d'ordre morphologique et tendent à caractériser d'abord le "disponible" (au travers des critères supposés liés aux possibilités de renouvellement des pools d'éléments à forte mobilité) et "la fraction" de ce dernier exploitable par les racines (cette fois-ci au travers de critères de caractérisation de l'extension et du fonctionnement du système racinaire). D'autres facteurs ou conditions de milieu modifient les possibilités d'accès à ces pools d'éléments les plus mobiles : niveau de satisfaction des besoins en eau et en azote notamment, ou encore état structural du sol. Il pourra donc être judicieux de moduler les seuils proposés en fonction de ces conditions de milieu.

■ Ce jeu de valeurs seuils T_{renf} et T_{imp} devra également être proposé par classe d'exigence vis-à-vis du P et du K. En effet, l'existence de trois classes d'exigence est bien révélatrice d'un comportement très différent des espèces vis-à-vis des éléments phosphore et potassium présents dans le sol : le "biodisponible" est, toutes choses égales par ailleurs, étroitement lié à la culture considérée.

Ceci nécessite donc d'adopter une méthodologie propre à fournir ces valeurs seuils.

La démarche proposée a déjà fait l'objet de nombreuses mises en oeuvre (1, 2, 3, 7, 12, 13, 15, 18, 20, 21, 22, 23) et ne s'en distinguera que par la prise en compte de façon plus formelle des trois niveaux d'exigence des cultures.

Le référentiel est constitué des essais de fertilisation PK de longue durée qui permettent le calcul des indices de rendement IR_{imp} et IR_{renf} selon le principe décrit dans le tableau 1.

Dose de P_2O_5 ou K_2O	Rendement observé	Indice de réponse	
		A l'impasse	Au renforcement
D_0	R_0	$IR_{imp} = \frac{R_{max} - R_0}{R_{max}} \times 100$	$IR_{renf} = \frac{R_2 - R_1}{R_{max}} \times 100$
D_1	R_1		
D_2	R_2		

D_0 = dose nulle ; D_1 = dose voisine de l'entretien ; D_2 = double de D_1
 R_{max} = meilleur rendement observé (R_0 ou R_1 ou R_2).

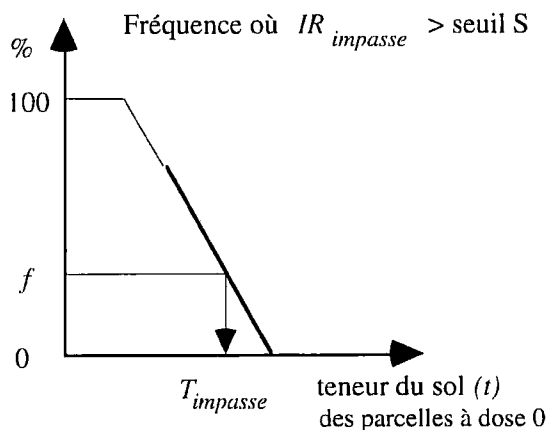
Tableau 1 - Calcul des indices de réponse pour l'établissement des valeurs T_{imp} et T_{renf}

Tous les ans, on peut donc calculer :

- la réponse ¹⁹ de la culture à l'impasse si c'est une culture de faible ou moyenne exigence (IR_{imp}) ;
- la réponse au renforcement de fumure si c'est une culture d'exigence moyenne ou élevée (IR_{renf}).

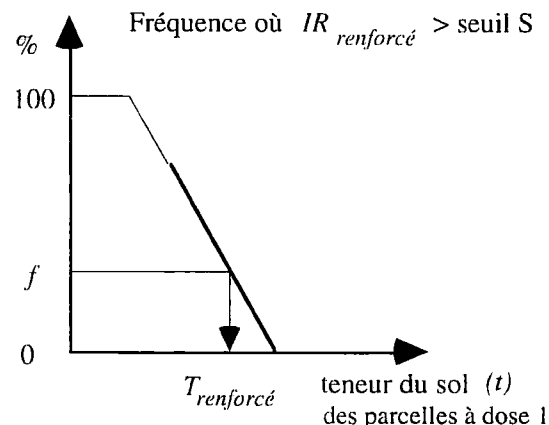
Ainsi, et toujours par type de sol, on peut confronter la teneur du sol (en P_2O_5 et K_2O) au nombre de cas où la réponse de la culture est "significative". Plus précisément, on construit les deux graphiques suivants :

■ **Comment trouver $T_{impasse}$** : chiffrer la réponse des cultures de faible et moyenne exigence à la suppression de fumure (un graphique pour chaque classe d'exigence).



Si $t < T_{impasse}$ on observe une chute de rendement d'au moins $S\%$ dans $f\%$ des cas : l'impasse est donc possible avec un risque acceptable si $t > T_{impasse}$ (moins de $f\%$ des cas présentant une chute de rendement supérieure à $S\%$).

■ **Comment trouver $T_{renforcé}$** : chiffrer la réponse des cultures de moyenne et forte exigence au renforcement de fumure (un graphique pour chaque classe d'exigence).



Si $t < T_{renforcé}$ on observe que le renforcement de fumure procure un gain de rendement d'au moins $S\%$ dans $f\%$ des cas.

- Le choix du seuil S sera dicté par la précision des essais et par des considérations d'ordre économique. Si "classiquement", compte tenu de la précision des essais de plein champ on retient souvent les seuils 5 ou 10 %, ce choix peut être différent en fonction de l'évolution du contexte économique et du niveau de risque acceptable par l'agriculteur. Ce niveau de risque acceptable orientera également le choix de f , T_{renf} et T_{imp} .

- Dans certains milieux, le nombre insuffisant d'essais ne permettra pas ce type d'approche pour la définition de T_{renf} et T_{imp} : il sera alors nécessaire d'opérer par extrapolation des références disponibles sur des milieux proches. On se reportera à (22, 13) pour obtenir des détails sur cette démarche expérimentale.

Classiquement on retient $f = 0$ et $S = 5$ ou 10% . On recherche donc T_{imp} et T_{renf} tels que respectivement une impasse n'entraîne **pas** de chute de rendement supérieure à 5 ou 10 % quand $t > T_{imp}$ et que le renforcement de fumure ne procure **pas** d'augmentation de rendement de plus de 5 ou 10 % quand $t > T_{renf}$.

Remarque :

La teneur t du sol pourra être remplacée par toute autre combinaison de critères jugée plus pertinente vis-à-vis du diagnostic.

¹⁹ **Réponse culturelle** : Toute variation significative observée, sur tout ou partie du végétal, résultant d'apports différenciés d'éléments fertilisants.

La réponse des cultures peut être appréciée par :

- le rendement commercialisable d'un produit
- les quantités d'éléments absorbés à un stade donné
- la qualité de la récolte
- les composantes du rendement.

4.1.2 Les résidus de culture du précédent

Par résidus de culture on entend ceux dont la restitution n'est pas obligatoire : parties aériennes des cultures récoltées en grain ou racines (pailles de céréales ou pois, cannes de maïs, tiges de colza, verts

de betteraves, ...). Le devenir des résidus de la culture précédente peut influencer de façon significative la réponse à la fertilisation minérale de la culture suivante.

Compte tenu du coefficient réel d'utilisation (CRU) du phosphore et du potassium contenus dans ces résidus, on assimile la restitution de ceux-ci à un apport équivalent d'engrais soluble eau. Il semble cependant opportun de situer un seuil de restitution (R_p pour P_2O_5 ou R_k pour K_2O) en dessous duquel on ne prend pas en compte l'effet résidus de culture. Ainsi, dans l'état actuel des connaissances on propose de considérer une situation avec résidus restitués lorsque R_p dépasse 40 kg de P_2O_5 par ha et R_k 80 kg de K_2O par ha.

4.1.3 Le passé récent de fertilisation

L'examen des comportements des essais de longue durée conduit à la prise en compte d'un phénomène décrit par ailleurs (voir chapitre 2.). On assiste à un arrière-effet²⁰ d'un apport d'engrais très variable selon les situations : en d'autres termes il y a perte de "mobilité" des éléments phosphore et potassium après apport, cette perte pouvant être très rapide ou au contraire très lente.

Les outils analytiques, dont nous disposons en routine, ne permettent pas de déceler de façon satisfaisante cette chute de "biodisponibilité" de l'élément apporté par l'engrais. Il faut donc proposer une appréciation de ce phénomène au travers d'autres critères : le **pouvoir fixateur** du sol et le **bilan F-E**²¹ (différence entre les fumures et les exportations).

4.1.3.1 Pouvoir fixateur

Il s'agit d'une caractéristique du sol pouvant être appréciée en l'état actuel des choses, selon différentes méthodes (pour P_2O_5 : FARDEAU, STUDER, pour K_2O : VAN DER MAREL).

Le tableau suivant précise les seuils permettant la ventilation dans trois classes.

Méthode	Appréciation		
	Faible	Modérée	Elevée
P_2O_5 FARDEAU (r_1/R)	> 0,4	0,2 - 0,4	< 0,2
STUDER (%)	< 70	70 - 95	> 95
K_2O VAN DER MAREL (%)	< 30	30 - 65	> 65

Tableau 2 - Caractérisation du pouvoir fixateur
Le pouvoir fixateur sera utilisé comme facteur de pondération du bilan cultural $\overline{F-E}$.

En pratique :

■ Si l'on ne dispose pas d'une mesure du pouvoir fixateur, on pourra en faire une estimation :

- Par confrontation du bilan F - E avec la variation de teneur du sol enregistrée sur la même période. Cette confrontation peut être établie sur la parcelle faisant l'objet du diagnostic ou sur un ensemble de parcelles constituées en réseau, dont la caractérisation aura montré qu'elles peuvent être considérées comme appartenant à un même ensemble homogène en matière de comportement vis-à-vis du phosphore ou du potassium ;

- Pour K_2O en utilisant une relation statistique établie régionalement qui prend en compte des critères analytiques accessibles à l'analyse de routine : K_2O échangeable, CEC, ... ;

- Pour P_2O_5 , en sols calcaires seulement, en utilisant la concentration C_p en P de la solution du sol et de la teneur en phosphore Olsen. En effet, il existe d'une part une bonne corrélation entre P Olsen et E_1 et d'autre part une relation

$$\frac{r_1}{R} = \frac{E_1}{C_p} \text{ d'où } \frac{r_1}{R} \cong k \times \frac{P \text{ Olsen}}{C_p}$$

r_1/R = fraction du traceur (radioactivité) restant en solution après une minute d'échange isotopique

E_1 = quantité calculée de phosphore isotopiquement échangeable en 1 minute

C_p = concentration en phosphore de la solution du sol.

4.1.3.2 - Bilan cultural $\overline{F-E}$

■ Il s'agit du solde moyen annuel pondéré (fumure - exportations) des quatre dernières années. Si l'on note $(F-E)_1$, $(F-E)_2$, $(F-E)_3$, $(F-E)_4$, les bilans F-E élémentaires respectivement des années n-1, n-2, n-3 et n-4 (n étant l'année en cours), on calcule F-E moyen noté par la suite $\overline{F-E}$:

$$\overline{F-E} = \frac{1}{2} \left[(F-E)_1 + \frac{(F-E)_2}{2} + \frac{(F-E)_3}{3} + \frac{(F-E)_4}{4} \right]$$

Ceci permet d'accorder un "poids" plus important au solde des années les plus proches (dénominateurs).

NB : • La multiplication par 1/2 permet de ramener F-E à une moyenne annuelle puisque $1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 = 2,1 \approx 2$.

• Dans le calcul de $\overline{F-E}$, seules les formes de phosphore adaptées au milieu seront prises en compte (voir chapitre 6.2.1).

²⁰ **Arrière-effet ou effet résiduel** : Conséquence à plus ou moins long terme des pratiques culturales sur la quantité d'un élément susceptible d'être mise à disposition du peuplement végétal ou transféré hors de la couche du sol prospectée par les racines.

²¹ **Bilan F-E** : Ce bilan représente pour un élément et une période (un ou plusieurs cycles culturaux) donnés, la différence les fumures et les exportations exprimées en kg/ha. Ce calcul est applicable à la parcelle, à un groupe de parcelles homogènes ou à l'exploitation.

■ On propose la création de trois classes diagnostiques de $\overline{F-E}$:

$$\begin{array}{l} \overline{F-E} \leq b_1 \\ b_1 < \overline{F-E} \leq b_2 \\ \overline{F-E} > b_2 \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \text{En première approche on pourrait} \\ \text{fixer pour } b_1 \text{ et } b_2 \text{ les valeurs} \\ \text{suyantes sujettent à révision en} \\ \text{fonction de l'état d'avancement des} \\ \text{connaissances et d'ajustement selon} \\ \text{les systèmes de culture} \\ b_1 = 0 \quad b_2 = 40 \text{ kg/ha pour } P_2O_5 \\ \quad \quad \quad 60 \text{ kg/ha pour } K_2O \end{array} \right.$$

4.1.3.3 Combinaison du bilan $\overline{F-E}$ et du pouvoir fixateur

Le tableau 3 expose la combinaison de ces deux critères pour l'appréciation du critère "passé récent de fertilisation".

$\overline{F-E}$	Pouvoir fixateur		
	Faible	Modérée	Elevée
$\overline{F-E} > b_2$	Favorable	Favorable	Moyen
$b_1 < \overline{F-E} \leq b_2$	Favorable	Moyen	Défavorable
$\overline{F-E} \leq b_1$	Moyen	Défavorable	Défavorable

Tableau 3 - Typologie du critère "passé récent de fertilisation" selon $\overline{F-E}$ et pouvoir fixateur

Quelques précisions :

Si l'on ne peut pas avoir accès au pouvoir fixateur et/ou au bilan $\overline{F-E}$, on propose d'utiliser le nombre d'années sans apport de P_2O_5 ou K_2O (soit n), comme indicateur . Le tableau 4 établit alors la correspondance entre N et les classes favorable, moyen, défavorable du critère "passé récent de la fertilisation".

Nombre d'années culturales (n) successives sans apport d'engrais (minéral ou organique)	0	1	≥ 2
Classe du critère "passé de fertilisation"	Favorable	Moyen	Défavorable

Tableau 4 - Evaluation du critère "passé récent de fertilisation" en l'absence d'estimation du bilan $\overline{F-E}$ et/ou du pouvoir fixateur

Remarque :

Une année de jachère couverte ne sera pas considérée comme une année d'impasse en terme de vieillissement. On prendra en compte l'importance de la restitution des résidus (cf. chapitre 4.1.2).

4.2 Le diagnostic global de biodisponibilité

Après avoir exposé séparément les différents éléments du diagnostic, il s'agit de les combiner pour porter une appréciation globale sur les possibilités d'accès aux éléments P et K du sol : c'est l'objet des tableaux 5 et 6.

Les bases de la démarche et la lecture des tableaux 5 et 6

Les différentes modalités des trois critères précédemment décrits (devenir des résidus du précédent, passé récent de fertilisation et teneur du sol) sont croisées avec le niveau d'exigence de la culture en phosphore et potassium pour aboutir à un jugement global de biodisponibilité : élevée (classe 3), moyenne (classe 2) ou faible (classe 1).

Ainsi construit, le tableau général amène à se positionner dans une des trois classes de biodisponibilité en phosphore et potassium : le conseil de fumure sera déduit selon les règles proposées au chapitre 5.

Pour P_2O_5 et par souci de simplification nous n'avons pas tenu compte du critère "devenir des résidus du précédent". S'il s'avérait que pour certaines cultures la restitution de résidus dépasse fréquemment plus de $R_p = 40$ kg de P_2O_5 /ha (voir 4.1.2), il faudrait alors proposer une estimation à la hausse de la biodisponibilité.

Si l'on ne dispose pas d'une analyse de terre permettant de connaître t (teneur analytique en P_2O_5 ou K_2O), on propose alors le raisonnement suivant :

■ s'il n'existe pas de facteurs ou conditions limitant le rendement (le réalisé est proche du potentiel) alors on suppose $T_{renf} < t < T_{imp}$ et on "rentre" dans les tableaux 5 et 6 ;

■ si le rendement observé est inférieur au potentiel on est en présence de facteurs ou conditions limitants :

- si $\overline{F-E} > 0$ (voir 4.1.3.2) on pourra conseiller de diminuer la fertilisation PK jusqu'à identification du facteur limitant

- si $\overline{F-E} \leq 0$ on conseillera une fertilisation correspondant à un niveau de biodisponibilité moyen (classe 2) : voir tableaux 5 et 6.

Devenir des résidus du précédent	Passé récent de fertilisation	Teneur du sol (1)	Exigence de la culture en P ₂ O ₅		
			Faible	Moyenne	Elevée
Indifférent (restitution généralement inférieure à 40 kg/ha P ₂ O ₅)	Favorable	T _{imp} < t	3	3	3
		T _{renf} < t < T _{imp}	2	2	2
		t < T _{renf}	2	2	2
	Moyen	T _{imp} < t	3	3	2
		T _{renf} < t < T _{imp}	2	2	2
		t < T _{renf}	1	1	1
	Défavorable	T _{imp} < t	2	2	2
		T _{renf} < t < T _{imp}	2	1	1
		t < T _{renf}	1	1	1

(1) T_{imp} et T_{renf} définis par classe d'exigence de la culture

Tableau 5 - Diagnostic de la biodisponibilité en P₂O₅ : 1 = faible ; 2 = moyenne ; 3 = élevée

Résidus du précédent	Passé récent de fertilisation	Teneur du sol (1)	Exigence de la culture en K ₂ O		
			Faible	Moyenne	Elevée
Restitués, brûlés	Favorable	T _{imp} < t	3	3	3
		T _{renf} < t < T _{imp}	2	2	2
		t < T _{renf}	2	2	2
	Moyen	T _{imp} < t	3	3	2
		T _{renf} < t < T _{imp}	2	2	2
		t < T _{renf}	2	1	1
	Défavorable	T _{imp} < t	2	2	2
		T _{renf} < t < T _{imp}	2	2	2
		t < T _{renf}	2	1	1
Exportés	Favorable	T _{imp} < t	3	3	2
		T _{renf} < t < T _{imp}	2	2	2
		t < T _{renf}	2	1	1
	Moyen	T _{imp} < t	3	2	2
		T _{renf} < t < T _{imp}	2	2	2
		t < T _{renf}	2	1	1
	Défavorable	T _{imp} < t	2	2	1
		T _{renf} < t < T _{imp}	2	1	1
		t < T _{renf}	1	1	1

(1) T_{imp} et T_{renf} définis par classe d'exigence de la culture

Tableau 6 - Diagnostic de la biodisponibilité en K₂O : 1 = faible ; 2 = moyenne ; 3 = élevée

Classe de biodisponibilité (voir tableaux 5 et 6)	Stratégie (voir 4)	Exigence de la culture					
		Faible		Moyenne		Elevée	
		P ₂ O ₅	K ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O (1)	P ₂ O ₅	K ₂ O
3 (élevée)	S ₃	0	0	0	(0)-0	1,0	1,0
2 (moyenne)	S ₂	1,0	1,0	1,0	(1,0)-1,5	1,5	1,2
1 (faible)	S ₁	1,2	1,0	1,5	(1,5)-2,0	2,5	2,0

(1) entre parenthèse : coefficients pour cultures dont on exporte la plante entière

Tableau 7 - Coefficients multiplicatifs des exportations pour le calcul des doses de P₂O₅ et K₂O

5. CONSEIL DE FUMURE : BASES DE PRESCRIPTION

Les conseils de fumure présentés sont applicables avec des formes d'engrais P_2O_5 solubles eau ou citrate d'ammonium neutre, mélangées au sol avant semis.

Le tableau 7 présente les conseils de doses selon la classe d'exigence en P_2O_5 ou K_2O de la culture en cause et le niveau de biodisponibilité caractérisé aux tableaux 5 et 6.

Ces conseils font référence au niveau d'exportation de la culture en place à l'aide d'un coefficient multiplicatif variant entre 0 et 2,5.

Pour K_2O , on distinguera deux populations distinctes de cultures moyennement exigeantes : celles n'exportant que les grains et celles exportant la plante entière (chacune justifiable d'un coefficient différent).

Ces bases de préconisations intègrent les réflexions de divers auteurs ayant eu à proposer des stratégies de fertilisation issues de l'examen des essais longue durée disponibles en France, notamment à l'INRA (4, 5, 16, 17).

Exemple :

Succession betterave-blé-pois-blé.

Limon profond sain.

Résidus de culture enfouis.

Précédent de la betterave non fertilisé.

NORMES D'INTERPRETATION (exemple)

Classe d'exigence de la culture	P_2O_5 Joret-Hébert (ppm)		K_2O échangeable (ppm)	
	T_{renf}	T_{imp}	T_{renf}	T_{imp}
Elevée	100	-	180	-
Moyenne	100	250	150	300
Faible	80	150	80	200

Résultat analyse de terre : P_2O_5 JH = 90 ppm
 K_2O éch = 250 ppm

DIAGNOSTIC BIODISPONIBILITE (cf. tableaux 5 et 6) ET CONSEILS DE FUMURE (F) (cf. tableau 7)

	P_2O_5		K_2O	
	Biodisponibilité	Fumure	Biodisponibilité	Fumure
Betterave	1	F = 2,5 x Exportations	2	F x 1,2 x Exportations
Blé	2	F = Exportations	3	F = 0
Pois	2	F = 1,5 x Exportations	2	F = 1,5 x Exportations
Blé	2	F = Exportations	3	F = 0

6. MODALITES D'APPORTS DES ENGRAIS PHOSPHATES ET POTASSIQUES

La productivité de l'unité fertilisante apportée sur une culture va dépendre à la fois des **qualités chimiques** et des **qualités physiques** de l'engrais utilisé.

Les qualités chimiques d'un engrais dépendent de la forme chimique de l'élément fertilisant utilisé, de sa solubilité ou non dans l'eau, de son association avec d'autres au moment de l'apport et de sa teneur dans l'engrais utilisé (titre garanti).

6.1 Aspects réglementaires

6.1.1 Formes du phosphore dans les engrais phosphatés

La réglementation sur les matières fertilisantes ²² (norme NF U 42-001) classe les engrais phosphatés suivant leur solubilité dans des réactifs conventionnels (tableau 8).

La solubilité mentionnée n'est pas suffisante pour juger du comportement agronomique de l'engrais phosphaté dans le sol. Elle permet par contre de préciser la nature chimique de l'engrais phosphaté utilisé.

Les tests utilisés aboutissant à cette classification ont pour but essentiel de contrôler l'exactitude des déclarations des formes et teneurs en P_2O_5 figurant sur les sacs des divers engrais, et de distinguer les différentes formes de P_2O_5 (tableau 9).

Si vous lisez sur l'étiquette "Solubilité dans ..."	Le phosphate est sous forme de
Citrate d'ammonium neutre et eau	Phosphate d'ammoniaque Superphosphate
Citrate d'ammonium alcalin (Peterman)	Phosphate bicalcique
Citrate d'ammonium alcalin (Joulie)	Phosphate aluminocalcique (Phospal)
Acide citrique	Scories Thomas
Acide formique	Phosphate naturel tendre
Acide fort	Phosphate naturel dur, pur ou en mélange

Tableau 9 - Formes de phosphore selon les réactifs

²² **Matière fertilisante** : Les matières fertilisantes comprennent les engrais, les amendements, et d'une manière générale, tout produit dont l'emploi est destiné à assurer ou à améliorer la nutrition des végétaux ainsi que les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols.

6.1.2 Formes du potassium dans les engrais potassiques

La même réglementation classe les engrais potassiques en faisant référence à une solubilité minimale dans l'eau, et pour certains produits à une teneur maximum de chlore (tableau 10).

Dénomination	Teneur minimale en K_2O	Autres exigences
Chlorure de potassium	37 % K_2O	Soluble dans l'eau
Chlorure de potassium contenant du sel de magnésium	29 % K_2O , 5 % MgO	Soluble dans l'eau
Sulfate de potassium	47 % K_2O	Soluble dans l'eau, pas plus de 3 % de chlore
Sulfate de potassium contenant du sel de magnésium	22 % K_2O , 8 % MgO	Soluble dans l'eau, pas plus de 3 % de chlore
Nitrate de potassium	42 % K_2O , 12 % N nitrique	Soluble dans l'eau, pas plus de 1 % de chlore
Extraits de vinasse	30 % K_2O	Soluble dans l'eau, pas plus de 1 % de chlore

Ces formes de potassium peuvent se trouver associées dans des binaires PK ou NK et dans les ternaires NPK

Tableau 10 - Engrais potassiques (NF U 42-001)

Dénomination	Teneur en P ₂ O ₅ minimale	Solubilité du P ₂ O ₅	Finesse de mouture			
			Pourcentage minimal, en masse, de passage au tamis à ouverture de maille de			
			0,063 mm	0,125 mm	0,160 mm	0,630 mm
Scories Thomas	12 % P ₂ O ₅ total	75 % au moins du P ₂ O ₅ total doit être soluble dans l'acide citrique 2 %	-	-	75 %	96 %
Super-phosphates normal	16 % P ₂ O ₅	Soluble dans le citrate d'ammonium neutre, 90 % au moins du P ₂ O ₅ déclaré soluble dans le citrate d'ammonium neutre doit être soluble dans l'eau	-	-	-	-
Super-phosphates concentré	25 % P ₂ O ₅					
Super-phosphates triple	38 % P ₂ O ₅					
Phosphate naturel partiellement solubilisé	20 % P ₂ O ₅	40 % au moins du P ₂ O ₅ total déclaré doit être soluble dans l'eau	-	-	90 %	98 %
Phosphate bicalcique	38 % P ₂ O ₅	Soluble dans le citrate d'ammonium alcalin (Peterman)	-	-	90 %	98 %
Phosphate précipité dihydraté		Soluble dans le citrate d'ammonium alcalin (Peterman)	-	-	75 %	96 %
Phosphate désagrégé	25 % P ₂ O ₅	75 % au moins du P ₂ O ₅ total doit être soluble dans le citrate d'ammonium alcalin (Joulié)	-	-	90 %	98 %
Phosphate naturel tendre	25 % P ₂ O ₅ total	55 % au moins du P ₂ O ₅ total déclaré doit être soluble dans l'acide formique à 2 %	90 %	99 %	-	-
Engrais NP	5 % P ₂ O ₅ avec 3 % N et la somme N + P ₂ O ₅ + K ₂ O = 18 %	Soluble dans le citrate d'ammonium neutre et/ou dans l'eau. L'écart entre le P ₂ O ₅ total et le P ₂ O ₅ soluble dans le citrate d'ammonium neutre ne doit pas dépasser 2 %. Si le P ₂ O ₅ soluble dans l'eau n'atteint pas 2 %, on ne peut déclarer que le P ₂ O ₅ soluble dans le citrate d'ammonium neutre	-	-	-	-

Ces formes de phosphate peuvent se trouver associées dans des engrais binaires PK ou NP et dans des ternaires NPK

Tableau 8 - Engrais phosphatés (NF U 42-001)

6.2 Formes d'engrais phosphatés et nature du sol : domaine d'utilisation

La réponse à la fertilisation phosphatée est en relation étroite avec la nature et la teneur du P_2O_5 dans le sol.

Le choix des engrais dépend en premier de la biodisponibilité du sol en phosphore.

6.2.1 Cas des sols à biodisponibilité du phosphore correcte ou élevée (tableau 11)

Dans le cas des sols très acides ($pH \text{ eau} \leq 5,5$) un chaulage préalable est souvent indispensable. En effet, la présence en trop grande quantité des ions fer ou aluminium perturbe le développement racinaire des cultures et s'avère être le premier facteur limitant.

En sol très sableux (Landes), un $pH \text{ eau}$ de 5,2 ne limite pas le développement du maïs

6.2.2 Cas des sols à faible biodisponibilité du phosphore

Il faut privilégier les formes phosphatées à grande solubilité dans l'eau.

6.2.3 Action des engrais phosphatés sur le pH eau du sol

La nature des engrais phosphatés utilisés peut modifier d'une façon significative le $pH \text{ eau}$ du sol.

Formes des engrais phosphatés	$pH \leq 5,5$	$5,5 < pH \text{ eau} \leq 6,2$	$6,2 \leq pH \text{ eau} \leq 7,2$ ou $CaCO_3 < 10 \%$	$CaCO_3 \geq 10 \%$
Phosphate d'am. Superphosphate				
Bicalciques				
Scories Thomas				
Phosphates alum. calciques				
Phosphates naturels				

Forme utilisable

Forme généralement déconseillée

Parmi les différentes formes, toutes n'ont pas la même efficacité ; l'efficacité relative est à prendre en compte sous l'angle agronomique et économique

Tableau 11 - Choix du type d'engrais selon le pH du sol

Ainsi les scories Thomas ont une valeur neutralisante importante. En sol acide l'effet chaux des scories s'ajoute à l'effet phosphore. Les phosphates naturels, le phosphate bicalcique, les superphosphates et le phosphate alumino-calcique n'ont pas d'effet significatif sur le pH du sol.

En sol très acide, si un chaulage n'est pas effectué, l'apport de phosphate d'ammonium accentue l'effet négatif de l'acidité du sol (en particulier augmentation du risque d'intoxication ammoniacale).

6.3 Qualité de l'épandage

Les engrais solides sont les plus répandus et se présentent sous des formes variées : granulée, perlée, compactée, cristallisée, pulvérulente.

La forme granulée est prédominante et continue à se développer aux dépens des autres présentations.

L'apport au sol des engrais nécessite un épandage précis et régulier sur la culture avec répartition homogène et conservation de la teneur en tout point de la parcelle.

Pour les engrais pulvérulents, l'apport se pratique au moyen d'épandeurs pendulaires ou centrifuges munis de protection (jupes en toile) ou avec des épandeurs équipés d'une vis de 6 m ou 8 m.

Pour les autres formes d'engrais solides, on utilise des épandeurs pneumatiques ou des épandeurs centrifuges.

De tous les épandeurs d'engrais utilisés en agriculture, l'épandeur centrifuge est de loin le plus fréquent. Il présente en effet les avantages suivants :

- investissement relativement faible
- nettoyage facile
- formes compactes
- simplicité de fonctionnement
- capacité de travail très grande.

La régularité d'épandage s'apprécie au moyen du coefficient de variation (pour n mesures de quantité d'engrais épandu au sol par m², sur la largeur d'épandage). Cette valeur peut varier de 5 à 40 %.

6.3.1 La dose d'engrais par hectare fertilisé

Il faut rechercher une précision d'au moins 8 % en évitant surtout les unités en trop. Pour cela, l'engrais doit avoir :

- une densité apparente connue et constante
- un taux d'humidité au voisinage de 1 % pour les NPK, à 5 % pour les PK
- un taux de poussière inférieur à 0,08 %
- une absence de prise en masse
- une sphéricité la meilleure possible pour assurer un écoulement sans contrainte dans la trémie de l'épandeur.

6.3.2 Une largeur d'épandage respectée

Pour atteindre la largeur de projection nécessaire à la largeur de passage choisie : 16 m, 20 m, 24 m, 28 m, 32 m avec les épandeurs centrifuges double plateau, il faut que l'engrais ait :

- un diamètre médian, D50, très voisin de 3,2 mm
- un étalement granulométrique inférieur à 1,2 mm pour 80 % des granulés
- une friabilité (ou taux de bris) la plus basse possible, inférieure à 5 %.

6.3.3 Une régularité d'épandage parfaite

La régularité d'épandage sera jugée satisfaisante, si la variation de la répartition au sol est inférieure à 8 %.

Pour cela, il faut que l'engrais ait :

- une dureté suffisante pour éviter l'éclatement et la formation de poussière sur les pales de l'épandeur centrifuge ;
- une densité suffisante pour effectuer le trajet correspondant à l'impulsion des pales de l'épandeur (au moins 850 g/litre) ;

- une bonne sphéricité pour que la trajectoire du granulé dans l'air soit la plus stable possible.

6.4 Efficacité des apports

L'efficacité agronomique des éléments phosphore et potassium apportés aux cultures peut être appréciée en première analyse par le supplément de production dû à la seule fertilisation P ou K. Or l'expérimentation agronomique a montré que pour la même quantité de phosphore ou de potassium apporté, la productivité pouvait varier d'une façon importante en fonction :

- de la solubilité eau de l'engrais
- de l'état physique de l'engrais
- du mode d'incorporation au sol
- du stade de développement de la culture au moment de l'apport.

6.4.1 Solubilité eau de l'engrais

Cette solubilité eau peut varier d'une façon considérable dans le cas des engrais phosphatés.

Solubilité dans un même volume d'eau à pH 7	Le phosphate est sous forme de
Elevée	Phosphate d'ammoniaque Superphosphate
Faible	Phosphate bicalcique Scories Thomas Phosphate alumino-calcique (Phospal)
Très faible	Phosphates naturels tendres et durs

Tableau 12 - Solubilité eau des engrais phosphatés

On a montré clairement que pour une même teneur en P₂O₅ soluble eau et citrate d'ammonium, l'efficacité des différents engrais testés était en liaison étroite avec le pourcentage de soluble eau dans ce total, mais aussi avec la facilité avec laquelle cette solubilisation dans l'eau se faisait (24).

Les engrais phosphatés ayant la solubilité dans l'eau la plus élevée sont donc les plus susceptibles d'accroître de manière significative, au moment de l'apport, la fraction du phosphore la plus assimilable du sol.

Pour les engrais potassiques, les formes chlorure, sulfate et nitrate ont des solubilités eau satisfaisantes mais les risques d'accidents par excès de salinité sont

plus élevés avec les formes chlorure et nitrate quand ces derniers sont apportés en très forte quantité.

6.4.2 L'état physique de l'engrais

La forme granulée facilite l'utilisation d'un matériel d'épandage précis et de grande largeur de travail (épandeur centrifuge double plateau). Mais la granulation de l'engrais diminue l'effet de dispersion et réalise une certaine forme de localisation dans le sol.

Pour les phosphates non ou peu solubles dans l'eau, le diamètre des particules est un critère essentiel, car il détermine la surface de contact entre le sol et les particules de phosphate, gage d'efficacité agronomique.

La granulation de l'engrais diminue l'efficacité agronomique des formes de phosphore peu ou pas soluble dans l'eau.

Pour ces produits, il faut respecter la finesse de mouture indiquée dans le tableau 8 et mélanger de manière la plus homogène possible l'engrais sur la profondeur de sol labouré.

Par contre la granulation améliore de façon marquée l'efficacité des formes d'engrais solubles dans l'eau. Le volume d'enrichissement du sol en phosphore autour des granules est d'autant plus important que la solubilité dans l'eau du phosphore est élevée.

En effet avec ce type de produit, un mélange homogène dans le sol d'un engrais phosphaté très soluble dans l'eau met rapidement en action les phénomènes de rétrogradation de l'élément P et réduit d'une façon significative l'intérêt du phosphore entièrement soluble dans l'eau : décroissance importante de l'activité des ions phosphatés dans les premières semaines qui suivent une incorporation au sol. Les techniques de localisation sont alors avantageuses car elles ralentissent d'une façon marquée cette perte de disponibilité.

6.4.3 Mode d'incorporation au sol

Dans la pratique agricole, on peut apporter les engrais P et K de deux manières :

- soit chercher à répartir l'engrais d'une manière la plus homogène possible dans le volume travaillé : engrais dispersé ;

- soit réaliser un enrichissement préférentiel d'une fraction seulement de ce volume, si possible dans une zone judicieusement située par rapport au système racinaire de la culture, la concentration locale en engrais étant dans ce cas plus élevée : engrais localisé.

La localisation a un effet favorable très net avec le phosphate d'ammonium très soluble dans l'eau. L'efficacité agronomique diminue avec la localisation du super triple granulé moins soluble à l'eau que le DAP et surtout avec le phosphate bicalcique granulé peu soluble dans l'eau. Par contre la dispersion dans le sol d'une forme entièrement soluble eau est défavorable à son efficacité.

La conjugaison des effets formes de phosphore et placement aboutit à une valorisation différente des fumures appliquées :

- toutes les formes de phosphore peu solubles dans l'eau doivent toujours être intimement mélangées avec le sol à fertiliser ;

- par contre le DAP et le superphosphate gagnent en efficacité par la pratique de la localisation. Cette dernière technique est particulièrement recommandée pour toutes les cultures annuelles semées à grand écartement (cas des cultures d'été).

6.4.4 Stade de développement de la culture au moment de l'apport

Chaque culture a une période plus ou moins longue d'absorption. Or l'activité des ions phosphates solubles eau décroît rapidement dans les toutes premières semaines qui suivent leur incorporation dans la masse du sol travaillé.

Par contre, l'apport de phosphore soluble eau en surface et sur une culture en place, au moment de son départ en végétation permet l'accroissement de la teneur des ions phosphates sur les 5 premiers centimètres de profondeur.

Ainsi dans les sols très argileux à fort pouvoir fixateur ou dans le cas de contrainte climatique forte du type ennoyage avec une température du sol basse (25), on observe sur les céréales à pailles d'hiver des enracinements limités, en même temps qu'une augmentation au voisinage du plateau de tallage de la colonisation racinaire superficielle du sol. De nombreux résultats d'expérimentation agronomique ont montré que les apports de phosphore soluble eau en début de végétation (stade 3 feuilles), dans les conditions pédoclimatiques qui viennent d'être évoquées, améliorent nettement la productivité de l'unité fertilisante P_2O_5 .

Remarque :

L'accroissement des teneurs du phosphore dans les eaux de surface est rarement dû à son lessivage toujours très faible, mais résulte plus fréquemment d'apports provenant du ruissellement et d'entraînements de terre arable par érosion.

7. CONTROLE DE LA FERTILISATION PRATIQUEE

La démarche de raisonnement présentée au chapitre 5 permet de prendre en compte quatre paramètres nécessaires à la définition d'une stratégie de fertilisation et à des doses d'apport :

- teneur analytique de la terre
- exigence des cultures mises en place
- devenir des résidus de récolte du précédent
- passé récent de fertilisation

La situation des teneurs analytiques mesurées par rapport aux teneurs seuils, issues des expérimentations de longue durée, permet de définir des orientations de stratégie.

Ce schéma décisionnel conserve un poids fort à l'interprétation des analyses. Or, compte tenu du faible nombre de références validées existantes, dans la plupart des cas, cette interprétation repose sur des hypothèses d'extrapolation ; ces hypothèses portent :

- sur l'évolution attendue des teneurs analytiques de la terre, suite à une fumure donnée
- sur l'alimentation des cultures dans des situations données de teneur analytique de la terre.

Afin de préciser ou de vérifier ces hypothèses, deux outils de contrôle peuvent être utilisés : une analyse de plante (F) ou une nouvelle analyse de terre (T) en complément de l'analyse de la variabilité des rendements.

Les paragraphes suivants présentent une première approche du contrôle de la fertilisation.

7.1 Analyse de plante F1 au même instant que l'analyse de terre initiale t1 (tableaux 13 et 14)

Ce type de contrôle permet de vérifier si l'alimentation des végétaux est en accord avec la biodisponibilité évaluée à partir notamment de l'interprétation de l'analyse de terre.

On peut distinguer schématiquement deux cas de figure :

■ l'analyse de plante confirme l'orientation de la stratégie de fertilisation issue de l'interprétation de l'analyse ;

■ les teneurs mesurées dans la plante révèlent un déficit ou un excédent alimentaire par rapport à la biodisponibilité estimée, ce qui suppose que :

- d'autres paramètres sont à prendre en compte : pouvoir fixateur du sol, "antagonismes" avec d'autre(s) élément(s), état structural du sol ;

- une vérification de la pertinence des bases d'estimation de la biodisponibilité est à effectuer.

7.2 Analyse de terre T2, suite à une analyse de terre initiale t1, après quelques années de culture (tableau 15)

Ce type de contrôle permet de vérifier si l'évolution de teneur enregistrée est en accord avec le bilan F-E portant sur la période écoulée entre les deux analyses.

On peut cependant distinguer trois cas de figures, selon la situation des bilans F-E réels par rapport aux bilans F-E qui auraient dû être enregistrés compte tenu de la stratégie de fertilisation préconisée à l'issue de la première analyse :

1. bilan F-E en accord avec la préconisation
2. bilan F-E excédentaire par rapport à la préconisation
3. bilan F-E déficitaire par rapport à la préconisation

Pour chaque cas possible, on peut déceler des situations où :

■ l'analyse de terre de contrôle confirme l'orientation de la stratégie initiale, compte tenu d'une bonne relation entre la mesure effectuée après quelques années de culture et le bilan F-E réel. Le choix des bases d'interprétation est conforté ;

■ l'analyse de terre de contrôle révèle une évolution normale, mais plus (ou moins) sensible que prévue. Les bases d'interprétation doivent être recalées ;

■ la teneur mesurée met en évidence une certaine incohérence entre l'évolution logique prévisible à partir de la teneur initiale et compte tenu du bilan F-E réel :

- des expertises complémentaires sont à effectuer
- les hypothèses concernant le fonctionnement des sols, sous-jacents aux bases d'interprétation utilisées, sont à revoir.

Potassium		Appréciation F_1		
		Elevée	Correcte	Faible
Appréciation de la biodisponibilité	Elevée	Confirmation de l'intérêt d'une réduction de fumure	Etat du sol probablement assez défavorable à une bonne absorption racinaire Vérifier qu'il n'y ait pas une trop forte alimentation azotée	Cas improbable, voir expertise → Révision des bases d'interprétation d'analyse de terre Vérifier s'il n'existe pas d'autres facteurs limitants de l'absorption
	Moyenne	Etat du sol probablement favorable à une bonne absorption racinaire Des réductions de fumures peuvent être envisagées	Confirmation de l'intérêt du maintien d'une fumure d'entretien normale	Etat du sol probablement assez défavorable à une bonne absorption racinaire Vérifier qu'il n'y ait pas une trop forte alimentation azotée
	Faible	Cas improbable, voir expertise → Révision des bases d'interprétation d'analyse de terre	Etat du sol probablement favorable à une bonne absorption racinaire	Confirmation de la nécessité d'un renforcement de fumure

Tableau 13 - Contrôles et stratégies de fertilisation potassique - Analyse de plante / analyse de terre (F_1/T_1)

Phosphore		Appréciation F_1		
		Elevée	Correcte	Faible
Appréciation de la biodisponibilité	Elevée	Confirmation de l'intérêt d'une réduction de fumure	Etat du sol probablement assez défavorable à une bonne absorption racinaire Sol à fort pouvoir fixateur Maintien de fumures d'entretien	Sol à fort pouvoir fixateur → Révision des bases d'interprétation d'analyse de terre Vérifier s'il n'existe pas d'autres facteurs limitants de l'absorption
	Moyenne	Etat du sol probablement favorable à une bonne absorption racinaire Des réductions de fumures peuvent être envisagées	Confirmation de l'intérêt du maintien d'une fumure d'entretien normale	Etat du sol probablement assez défavorable à une bonne absorption racinaire Sol à fort pouvoir fixateur Fumures d'entretien renforcées
	Faible	Sol à faible pouvoir fixateur → Révision des bases d'interprétation d'analyse de terre	Etat du sol probablement favorable à une bonne absorption racinaire	Confirmation de la nécessité d'un renforcement de fumure

Tableau 14 - Contrôles et stratégies de fertilisation phosphatée - Analyse de plante / analyse de terre (F_1/T_1)

Cl. bio. *	Bilan F-E entre t_1 et t_2	ΔF	ΔE	Commentaires ①	Commentaires ② selon le contrôle T_2		
					Elevée	Correcte	Faible
Elevée	> 0	↗	= ou ↘	Nécessité d'une meilleure adaptation des niveaux de fumures aux niveaux d'exportations	Compte tenu de la teneur initiale, le contrôle est normal ; des réductions globales de fumures sont conseillées	Cas improbables ; faire une expertise complémentaire	
		=	↘				
	= 0	↗	↗	Adaptation correcte des niveaux d'exportations	Compte tenu de la teneur initiale, le contrôle est normal ; des réductions globales de fumures sont possibles	Maintenir des fumures d'entretien normales ; refaire rapidement un contrôle	Cas improbable ; faire une expertise complémentaire
		=	=				
		↘	↘			Maintenir des fumures d'entretien normales ; refaire rapidement un contrôle	
	< 0	=	↗	Nécessité d'une meilleure adaptation des niveaux de fumures aux niveaux d'exportations	Compte tenu de la teneur initiale, le contrôle est normal ; des réductions globales de fumures restent encore possibles	Reprendre des fumures d'entretien normales, puis refaire un contrôle	Renforcer les fumures d'entretien puis refaire un contrôle
↘		= ou ↗					
Moyenne	> 0	↗	= ou ↘	Nécessité d'une meilleure adaptation des niveaux de fumures aux niveaux d'exportations	Compte tenu du bilan F-E, le contrôle est normal ; des réductions globales de fumures sont possibles	Maintenir des fumures d'entretien normales ; puis refaire un contrôle	Cas improbable ; faire une expertise complémentaire
		=	↘				
	= 0	↗	↗	Adaptation correcte des niveaux de fumures aux niveaux d'exportations	Maintenir des fumures d'entretien normales et refaire un contrôle	Compte tenu de la teneur initiale, le contrôle est normal ; maintenir des fumures d'entretien normales	Renforcer légèrement les fumures d'entretien et refaire un contrôle
		=	=				
		↘	↘				
	< 0	=	↗	Nécessité d'une meilleure adaptation des niveaux de fumures aux niveaux d'exportations	Réduire les fumures d'entretien ; refaire rapidement un contrôle	Reprendre des fumures d'entretien normales puis refaire un contrôle	Renforcer nettement les fumures d'entretien ; refaire rapidement un contrôle
↘		= ou ↗					
Faible	> 0	↗	= ou ↘	Nécessité d'une meilleure adaptation des niveaux de fumures aux niveaux d'exportations	Maintenir des fumures d'entretien normales et refaire un contrôle	Compte tenu de la teneur initiale, le contrôle est normal ; maintenir des fumures d'entretien normales	Renforcer encore les fumures d'entretien puis refaire un contrôle
		=	↘				
	= 0	↗	↗	Adaptation correcte des niveaux de fumures aux niveaux d'exportations	Réduire les fumures d'entretien ; refaire rapidement un contrôle	Maintenir des fumures d'entretien normales ; puis refaire un contrôle	Compte tenu de la teneur initiale, le contrôle est normal ; renforcer les fumures d'entretien
		=	=				
		↘	↘				
	< 0	=	↗	Nécessité d'une meilleure adaptation des niveaux de fumures aux niveaux d'exportations	Cas improbable ; faire une expertise complémentaire	Renforcer les fumures d'entretien ; refaire rapidement un contrôle	Compte tenu de la teneur initiale, le contrôle est normal ; renforcer très nettement les fumures d'entretien
↘		= ou ↗					

T_1 = teneur analyse de terre au temps t_1

T_2 = teneur analyse de terre au temps t_2

* Cl. bio. = classe de la biodisponibilité

Tableau 15 - Contrôles et stratégies de fertilisation T_2/T_1

Classe de biodisponibilité	Bilan F-E entre t_1 et t_2	Commentaires ①	Commentaires ② selon le contrôle F_2		
			Elevée	Correcte	Faible
Elevée	> 0	Nécessité d'une meilleure adaptation des niveaux de fumures aux niveaux d'exportations	Vérification confirme réduire nettement les fumures	Il existe probablement d'autres facteurs limitants. Faire expertise complémentaire	
	= 0	Adaptation correcte des niveaux d'exportations	Vérification confirme réduire nettement les fumures	Maintenir des fumures normales ; refaire une vérification (revoir les références utilisées)	Il existe probablement d'autres facteurs limitants. Faire expertise complémentaire
	< 0	Nécessité d'une meilleure adaptation des niveaux de fumures aux niveaux d'exportations	Vérification confirme réduire encore les fumures ou maintien à faible niveau	Reprendre des fumures normales après réduction ; refaire une vérification	Reprendre des fumures normales ; refaire une vérification (revoir les références utilisées)
Moyenne	> 0	Nécessité d'une meilleure adaptation des niveaux de fumures aux niveaux d'exportations	Vérification confirme réduire les fumures	Maintenir des fumures normales ; refaire une vérification (revoir les références utilisées)	Il existe probablement d'autres facteurs limitants. Faire expertise complémentaire
	= 0	Adaptation correcte des niveaux de fumures aux niveaux d'exportations	Vérification révèle situation à forte souplesse. Maintenir (ou réduire) les fumures	Vérification confirme maintenir des fumures normales	Maintenir des fumures normales ou faire des fumures élevées ; refaire une vérification
	< 0	Nécessité d'une meilleure adaptation des niveaux de fumures aux niveaux d'exportations	Vérification révèle situation à forte souplesse. Réduire les fumures (revoir les références utilisées)	Vérification révèle situation à forte souplesse. Maintenir les fumures	Vérification confirme augmenter les fumures
Faible	> 0	Nécessité d'une meilleure adaptation des niveaux de fumures aux niveaux d'exportations	Maintenir des fumures normales ; refaire une vérification (revoir les références utilisées)	Vérification confirme reprendre des fumures normales ; refaire une vérification	Maintenir des fumures élevées ; refaire une vérification
	= 0	Adaptation correcte des niveaux de fumures aux niveaux d'exportations	Résultat anormal ; faire expertise complémentaire ; revoir les références utilisées	Résultat anormal ; faire expertise complémentaire ; revoir les références utilisées	Vérification confirme augmenter nettement les fumures
	< 0	Nécessité d'une meilleure adaptation des niveaux de fumures aux niveaux d'exportations	Résultat anormal ; faire expertise complémentaire ; revoir les références utilisées	Résultat anormal ; faire expertise complémentaire ; revoir les références utilisées	Vérification confirme augmenter nettement les fumures

T_1 = teneur analyse de terre au temps t_1

F_2 = teneur analyse de plante au temps t_2

Tableau 16 - Contrôles et stratégies de fertilisation F_2/T_1

7.3 Analyse de plante F2, suite à une analyse de terre initiale t1, après quelques années de culture (tableau 16)

Ce type contrôle permet de vérifier si l'alimentation de la plante est en accord avec la biodisponibilité qui pouvait être estimée à partir de l'analyse de terre initiale et des bilans F-E réels.

On peut cependant distinguer trois cas de figures, selon la situation des bilans F-E réels par rapport aux bilans F-E qui auraient dû être enregistrés compte tenu de la stratégie de fertilisation préconisée à l'issue de la première analyse :

1. bilan F-E en accord avec la préconisation
2. bilan F-E excédentaire par rapport à la préconisation
3. bilan F-E déficitaire par rapport à la préconisation

Pour chaque cas possible, on peut déceler des situations où :

■ l'analyse de terre de contrôle confirme l'orientation de la stratégie initiale, et l'estimation de la biodisponibilité, compte tenu d'une bonne relation entre la mesure effectuée après quelques années de culture et le bilan F-E réel. Le choix des bases d'interprétation est conforté ;

■ l'analyse de plante de contrôle révèle une évolution normale, mais plus (ou moins) sensible que prévue. Les bases d'interprétation doivent être recalées et/ou d'autres paramètres sont à prendre en compte pour mieux évaluer la biodisponibilité ;

■ la teneur mesurée met en évidence une certaine incohérence entre l'évolution logique prévisible à partir de la teneur initiale et compte tenu du bilan F-E réel :

- des expertises complémentaires sont à effectuer ;
- les hypothèses concernant le fonctionnement des sols, sous-jacents aux bases d'interprétation utilisées sont à revoir ;
- d'autres paramètres d'évaluation de la biodisponibilité sont à prendre en compte.

8. BIBLIOGRAPHIE

(1) BALLAND, QUEMENER (1982) - Comment mettre au point des normes d'interprétation ? Exemple du Sud-Ouest. *Forum Fertilisation*, Atelier 2, COMIFER 21-22 janvier 1982.

(2) BARBIER (1984) - Fertilisation PK Nord et Bassin Parisien. *Mémoire de fin d'études ESITPA-ITCF*, 127 p.

(3) BARRE (1983) - Synthèse des essais PK de l'Ouest de la France.

(4) BONIFACE, TROCME (1988) - Enseignements fournis par des essais de longue durée sur la fumure phosphatée et potassique. "2 - Essais sur la fumure phosphatée". Phosphore et potassium dans les relations sol-plante : conséquences sur la fertilisation. INRA, pp 279-402.

(5) BOSC (1988) - Enseignements fournis par des essais de longue durée sur la fumure phosphatée et potassique. "3 - Essais sur la fumure potassique". Phosphore et potassium dans les relations sol-plante : conséquences sur la fertilisation. INRA, pp 403-467.

(6) CALVET (1988) - Analyse du concept de biodisponibilité d'une substance dans le sol. *Sciences du sol*, vol. 26-3, pp 183-202.

(7) FABRE (1989) - Synthèse de la connaissance des essais fertilisation P, K, Ca, Mg en Rhône-Alpes. Amélioration du référentiel. Chambre Régionale d'Agriculture Rhône-Alpes. 32 p + annexes.

(8) FARDEAU, MOREL, BONIFACE (1988) - Pourquoi choisir la méthode Olsen pour estimer le phosphore "assimilable" des sols. *Agronomie*, 8, pp 577-584.

(9) FARDEAU, MOREL, BONIFACE (1991) - Cinétiques de transfert des ions phosphates du sol vers la solution du sol. *Agronomie*, 11, pp 787-797.

(10) FARDEAU (1992) - Fertilisation phosphatée et potassique raisonnée des cultures ou comment fumer raisonnablement sans risque. Base de connaissances scientifiques et exemples d'application. CEA-DPVE. Document de travail COMIFER. 40 p.

(11) FARDEAU (1993) - Le phosphore assimilable des sols : sa représentation par un modèle fonctionnel à plusieurs compartiments. *Agronomie* (sous presse).

(12) ISSALY (1981) - L'anhydride phosphorique dans les sols du grand Sud-Ouest. *Mémoire de fin d'études ESA Purpan-GESA*, mai 1981. 107 pp + annexes.

(13) JULIEN (1989) - Détermination de normes d'interprétation d'analyse de terre en vue de la fertilisation potassique. *Sciences du sol*, vol. 27-3, pp 131-144.

(14) LAURENT, TAUREAU, DIAB (1988) - Elaboration des normes d'interprétation en région Centre. *Perspectives Agricoles* n° 127, pp 142-150.

(15) LAURENT, TAUREAU, PLET (1988) - Méthodologie pour l'obtention des normes d'interprétation. *Perspectives Agricoles* n° 127, pp 122-124.

(16) MARTINEZ, DELAS (1990) - Les essais de longue durée INRA sur la fertilisation phosphatée. Recueil et synthèse des données récentes. IMPHOS. 103 p.

(17) MOREL, PLENCHETTE, FARDEAU (1992) - La fertilisation phosphatée raisonnée de la culture du blé. *Agronomie*, 12, pp 565-579.

(18) PLET, RUELLAN (1988) - Typologie des sols : quelques réflexions sur la démarche. Application au raisonnement de la fertilisation. *Perspectives Agricoles* n° 127, pp 128-141.

(19) SARAGONI (1988) - L'interprétation de l'analyse de terre sur les plateaux de Bourgogne. *Perspectives Agricoles* n° 127, pp 154-157.

(20) TAUREAU (1988) - Applications aux limons de l'Eure. Applications aux limons sur schiste de l'Ouest de la France. *Perspectives Agricoles* n° 127, pp 158-161.

(21) VILLEMIN (1987) - Conversion des données analytiques en conseil de fertilisation potassique. *Les dossiers agronomiques d'Aspach-le-Bas* n° 2, pp 39-57.

(22) VILLEMIN (1987) - Diagnostic de la fertilité phosphatée des sols. Les premières journées de l'analyse de terre : l'analyse du phosphore. L'analyse de terre, outil de développement. GEMAS. Blois 3-4 décembre 1987, 14 p.

(23) Collectif (1988) - Synthèse des essais P_2O_5 en terres de craie. *Perspectives Agricoles* n° 127, pp 151-153.

(24) FOURCASSIE, GADET (1967) - Efficacité agronomique comparée de divers composés phosphatés en relation avec leur solubilité, leur état et leur placement dans le sol. *Colloque International sur les phosphates minéraux solides*. Toulouse.

(25) GUYOT, PRIOUL (1985) - Correction par la fertilisation minérale des effets de l'ennoyage sur blé d'hiver. I - Expérimentation sur sol. II - Expérimentation en culture hydroponique. *Agronomie*, 5 (8), pp 743-759.

Autre littérature utilisée

FOURCASSIE (1964) - Essais factoriels P_2O_5 x formes d'engrais phosphatés x amendements. Essais en vases de végétation. *Bulletin de l'AFES* n° 12, Décembre 1964.

GRANDE PAROISSE S.A. (1990) - Engrais complexes, engrais bulks ? Quel produit, quel titre, quel comportement à l'épandage ?

QUEMENER (1984) - Les états du potassium dans le sol et conséquences sur l'alimentation des plantes. *C.R. Acad. Agri. de France* n° 11, pp 1377-1392.

QUEMENER (1985) - Complémentarité de l'expérimentation et des études de la dynamique du potassium pour la régionalisation du commentaire d'analyse de sol. *C.R. Acad. Agri. de France*, 71, n° 4, pp 389-401, Séance du 6 mars.

QUEMENER (1988) - L'offre alimentaire du sol en potassium. *Perspectives Agricoles* n° 127.

VILLEMIN, QUEMENER (1987) - a) Dynamique du potassium et fertilisation potassique des terres de craies.

1. Dynamique du potassium. Dossiers Agronomiques d'Aspach-le-Bas n° 1.
2. Fertilisation potassique. Dossiers Agronomiques d'Aspach-le-Bas n° 3.

YANKOVITCH (1953) - Intérêt de la granulation du superphosphate dans les terres d'acidité différente. *Annales du Service Botanique et Agronomique de Tunisie*. Vol. 26.

ANNEXES

LISTE DES ESSAIS LONGUE DUREE

CARACTERISTIQUES DES ESSAIS P₂O₅

N°	Commune	Organismes principaux	Dépt	Année début	Durée (ans)	Type de sol
1	Barbezieux	INRA	16	1977	13	Craie
2	Tusson	INRA	16	1968	16	Limon argileux calcaire
3	Champniers	INRA	16	1968	21	Argilo-calc. superficiel
4	St Félix	INRA	17	1979	14	Limon argileux, calcaire
5	Beauvais/M.	INRA	17	1968	9	Argilo-calc. superficiel
6	Jonzac	INRA	17	1972	14	Argilo-calc. superficiel
7	St Palais	INRA	18	1977	7	Limon argilo-sableux
8	Dampierre	INRA	18	1977	6	Limon
9	Sours	AGPM-CA	28	1972	17	Argilo-limoneux
10	Miermaigne	AGPM-CA	28	1976	17	Limon battants humides
11	La Salvetat	INRA	31	1964	21	Argilo-calcaire
12	Auzeville INRA 1	INRA	31	1969	24	Argilo-limoneux
13	Auzeville INRA 2	INRA	31	1969	24	Argilo-limoneux
14	St Aubin	INRA-CA	36	1963	10	Argilo-calcaire
15	Buzançais	INRA-CA	36	1978	7	Argilo-calcaire
16	Ligré	INRA-CA	37	1976	14	Argilo-calc., craie aubue
17	Carcarès Ste-Croix	INRA	40	1972	21	Sableux
18	Mant	INRA	40	1975	17	Limon sablo argileux
19	Valaire	INRA	41	1973	6	Limon battant humide
20	Josnes	INRA-CA	41	1977	13	Argilo-calcaire
21	Chapelle St M	INRA-CA	41	1977	14	Limon argilo-calcaire
22	Maves	INRA-CA	41	1977	14	Limon argileux
23	Tripleville	INRA-CA	41	1974	10	Limon
24	Villexanton	INRA-CA	41	1977	13	Limon argileux
25	L'Epine	INRA	51	1974	11	Craie
26	Auve	INRA	51	1974	5	Craie
27	Châlons/Marne 2	INRA	51	1975	13	Argilo limoneux calcaire
28	Janvilliers	AGPM-CA	51	1975	17	Limono-argileux-calcaire
29	Châlons/Marne 1	INRA	51	1975	13	Argilo limoneux calcaire
30	Télégraphe	INRA	51	1974	14	Argilo calcaire
31	Braux Ste Cohière	INRA	51	1977	11	Argilo-limoneux calcaire
32	Jonchery	AGPM-CA	52	1977	14	Limono-argileux
33	Clermont-Fer. M5	INRA	63	1969	21	Limon argileux calcaire
34	Clermont-Fer. a1	INRA	63	1950	20	Limon argileux calcaire
35	Clermont-Fer. a2	INRA	63	1970	20	Limon argileux calcaire
36	Thèze	AGPM	64	1973	17	Limon argileux
37	Villiers St Georges	AGPM	77	1972	8	Argileux
38	La Chapelle la Reine 1	AGPM	77	1975	15	Limono-argileux-sableux
39	La Chapelle la Reine 2	AGPM	77	1975	15	Limono-argileux-sableux
40	Versailles a1	INRA	78	1946	20	Limon
41	Versailles a2	INRA	78	1966	20	Limon
42	Ste Maxire	INRA	79	1968	9	Argilo-calc. superficiel
43	St Georges de Rex	INRA	79	1968	17	Argilo-calc. superficiel
44	St Michel le Cloucq	INRA	85	1971	12	Argilo-calc. superficiel
45	Vendoeuvre	INRA	86	1981	12	Limon argileux, calcaire
46	Thure	INRA	86	1967	24	Argilo-calcaire
47	Gréoux	ITCF	4	1977	11	Argilo-calcaire
48	Herbisse 1	ITCF-ARCIS	10	1982	7	Craie

CARACTERISTIQUES DES ESSAIS P₂O₅ (suite)

N°	Commune	Organismes principaux	Dépt	Année début	Durée (ans)	Type de sol
49	Herbisse 2	ITCF-ARCIS	10	1982	5	Craie
50	Ennordres	ITCF-UCATA	18	1980	8	Sableux
51	Guichainville-1	ITCF-GRCETA	27	1979	13	Limon
52	Guichainville-2	ITCF-GRCETA	27	1979	13	Limon
53	Guichainville-3	ITCF-GRCETA	27	1979	13	Limon
54	La Vieille Lyre 1	CA-AZF	27	1976	12	Limon battant
55	La Vieille Lyre 2	CA-AZF	27	1976	12	Limon battant
56	La Vieille Lyre 3	CA-AZF	27	1976	12	Limon battant
57	Nérac	ITCF	47	1976	11	Limon
58	Seuzey	ITCF	55	1987	4	Argilo calcaire
59	Pouigny A	ITCF-CA	58	1980	11	Argilo-limoneux
60	Pouigny B	ITCF-CA	58	1980	11	Argilo-limoneux
61	Larreule	ITCF	65	1978	13	Limon argileux
62	Tennie 1	ITCF-CA	72	1979	13	Limono-argileux
63	Tennie 2	ITCF-CA	72	1979	13	Limono-argileux
64	Villieu	SCPA	1	1977	6	Argilo-sableux
65	Ozoir le Breuil	SCPA	28	1964	21	Limon
66	C.A 28	SCPA	28	1977	10	Limon
67	Tauxigny	SCPA	37	1965	9	Limono-argileux
68	Venours	SCPA	86	1966	18	Limon moyen
69	Lasbordes	CAL	11	1973	7	Argilo-limono-sableux
70	Villespy	CAL	11	1973	7	Argilo calcaire
71	Castelnaudary	CAL	11	1970	21	Argilo limoneux calcaire
72	Ribouisse	CAL	11	1973	8	Argilo calcaire -
73	Mondouzil	AZF	31	1978	10	Limono-argilo-sableux
74	Masseube	CACG	32	1976	14	Limon
75	St Médard	AZF	36	1979	9	Limon
76	Villechauve	AZF	41	1977	10	Limon battant
77	Gigny	AZF	89	1966	23	Limono-argilo-sableux
78	Neuilly	AZF	89	1965	18	Argilo-calcaire superficiel
79	Bignan	SCPA	56	1985	8	Limon
80	Cibeins	SCPA	1	1981	8	Limon sablo-argileux
81	Dampierre/B	SCPA	28	1982	10	Plein de cailloux
82	Laval	SCPA	53	1969	8	Limon fin
83	StBenoît/Seine	SCPA	10	1976	10	Argilo-calcaire superficiel
84	Yvetot A	ITCF-CA	76	1988	5	Limon fin profond
85	Yvetot B	ITCF-CA	76	1987	5	Limon fin profond
86	Belleau	SCPA-CETA	2	1964	9	Limon fin
87	Toury	SCPA	28	1958	12	Argilo-limoneux
88	Pocancy 1	SCPA	51	1958	9	Craie
89	Pocancy 2	SCPA	51	1958	9	Craie
90	Pocancy 3	SCPA	51	1958	10	Craie
91	Seuzey	ITCF	55	1987	6	Argilo-calcaire
92	Lorigné	CA 79	79	1983	8	Limono-argileux

CARACTERISTIQUES DES ESSAIS K₂O

N°	Lieux	Organismes principaux	Dépt	Année début	Durée (ans)	Type de sol
1	Nérac	ITCF	47	1976	13	Limon profond sain
2	Larreule	ITCF	65	1978	15	Limon profond sain
3	Villechauve	AZF	41	1977	11	Limon battant profond
4	Neuilly	AZF	89	1965	18	Argilo-calcaire superficiel
5	Mondouzil	AZF	31	1978	10	Argilo-calcaire
6	Gigny	AZF	89	1966	23	Limono-argileux
7	Levignac de Guyenne	SCPA	47	1962	13	Argilo-calcaire
8	La Sauvetat	SCPA	32	1968	7	Argilo-calcaire
9	Mazères 1	SCPA	9	1964	9	Limon profond
10	Gramont	SCPA	82	1963	10	Argilo-calcaire profond
11	Avignonet 112	SCPA	31	1963	10	Argilo-calcaire
12	Auzeville Lycee	SCPA	31	1978	9	Argilo-limoneux
13	Juzes	SCPA	31	1979	5	Argilo-calcaire
14	Ste Livrade	SCPA	47	1979	5	Sableux
15	Dax	SCPA	40	1979	9	Sablo-limoneux
16	St Elix le Château	SCPA	31	1980	9	Limon caillouteux
17	Versailles 24	INRA	78	1950	29	Limon
18	Auzeville INRA	INRA	31	1969	24	Argilo-limoneux
19	Villieu	SCPA	1	1977	6	Argilo-sableux
20	La Côte St André	SCPA	38	1977	10	Limon caillouteux
21	St Pourçain sur Besbre	SCPA	3	1979	12	Argilo-limoneux
22	Lons le Saunier	SCPA	39	1977	12	Argilo-limoneux
23	Cibeins	SCPA	1	1981	8	Limon sablo-argileux
24	St Etienne en Br.-1	SCPA	71	1967	11	Limon
25	St Etienne en Br.-2	SCPA	71	1969	15	Limon
26	Faramans	SCPA	1	1968	11	Limon
27	Moirans	SCPA	38	1970	11	Argilo-calcaire
28	Pont du Chateau	SCPA	63	1978	4	Argilo-calcaire
29	Pessat Villeneuve	SCPA	63	1978	4	Argilo-calcaire
30	Lucay le L.	INRA	36	1968	19	Argilo-calcaire superficiel
31	Dampierre	C.A.	28	1977	10	Limon
32	Ozoir le Breuil	SCPA	28	1964	22	Limon profond
33	Villexanton	INRA-CA	41	1977	10	Limon profond
34	Josnes	INRA-CA	41	1977	10	Argilo-calcaire profond
35	Tripleville	INRA-CA	41	1974	10	Limon profond
36	Valaire	INRA	41	1973	6	Limon battant humide
37	Montargis	SCPA	45	1967	20	Sablo-argilo-calcaire
38	Gy les Nonains	SCPA	45	1977	14	Limono-argileux
39	Gours	SCPA	16	1971	19	Argilo-calcaire superficiel
40	Perigny	SCPA	17	1964	24	Argilo-calcaire superficiel
41	Venours	SCPA	86	1966	18	Limon
42	Chaumont	SCPA	52	1977	10	Argilo-calcaire superficiel
43	Rampillon	SCPA	77	1969	16	Limon profond
44	Somme-Vesle	SCPA	51	1977	12	Craie
45	Marigny le Chatel	SCPA	10	1981	10	Craie
46	Precy le Sec	SCPA	89	1982	7	Argilo-calcaire superficiel
47	St Jean/Moivre	SCPA	51	1968	21	Craie
48	Gréoux (K)	ITCF	4	1977	6	Argilo-calcaire
49	Locmaria	SCPA	56	1966	9	Limon
50	Rennes le Rheu	SCPA	35	1981	10	Limon sablo-argileux
51	Omiécourt	INRA-SCPA	80	1960	30	Limon
52	Arras	SCPA	62	1977	14	Limono-argileux
53	Sancourt-1	SCPA	59	1961	15	Sablo-limoneux
54	Sancourt-2	SCPA	59	1961	15	Sablo-limoneux
55	Allonville	INRA	80	1954	22	Limon

CARACTERISTIQUES DES ESSAIS K₂O (suite)

N°	Lieux	Organismes principaux	Dépt	Année début	Durée (ans)	Type de sol
56	Valence	SCPA	26	1978	12	Argilo-calcaire
57	Uzès	SCPA	30	1979	8	Argilo-calcaire
58	Beauvais/M.	INRA	17	1968	9	Argilo-calcaire superficiel
59	St Georges de Rex	INRA	79	1968	16	Argilo-calcaire superficiel
60	St Michel le Clouq	INRA	85	1971	12	Argilo-calcaire superficiel
61	Champniers	INRA	16	1968	21	Argilo-calcaire superficiel
62	Tusson	INRA	16	1968	14	Argilo-calcaire superficiel
63	Puch d'Agenais	SCPA	47	1968	10	Limon
64	Tauxigny	SCPA	37	1965	9	Limono-argileux
65	Castelnaudary	SCPA	11	1970	13	Argilo-calcaire
66	Masseube	CACG	32	1976	10	Limon
67	Guichainville-1	ITCF-GRCETA	27	1979	13	Limon
68	Guichainville-2	ITCF-GRCETA	27	1979	13	Limon
69	Guichainville-3	ITCF-GRCETA	27	1979	13	Limon
70	Herbisse 1	ITCF-ARCIS	10	1981	7	Craie
71	Herbisse 2	ITCF-ARCIS	10	1981	5	Craie
72	Tennie 1	ITCF-CA	72	1979	13	Limono-argileux
73	Tennie 2	ITCF-CA	72	1979	13	Limono-argileux
74	Marbeuf 1	SCPA	27	1965	8	Limon
75	Marbeuf 2	SCPA	27	1965	8	Limon
76	Jonchery	AGPM-CA	52	1977	14	Limono-argileux
77	Janvilliers	AGPM-CA	51	1975	17	Limono-argileux
78	Chapelle la Reine 1	AGPM	77	1975	15	Limono-argileux
79	Chapelle la Reine 2	AGPM	77	1975	15	Limono-argileux
80	Miermaigne	AGPM-CA	28	1976	17	Limon battant humide
81	Pouigny A	ITCF-CA	58	1980	11	Argilo-limoneux
82	Pouigny B	ITCF-CA	58	1980	11	Argilo-limoneux
83	Ennordres 1	ITCF-UCATA	18	1980	8	Sableux
84	Ennordres 2	ITCF-UCATA	18	1980	8	Sableux
85	Coincy-R0	SCPA	2	1968	20	Limon
86	Coincy-R1	SCPA	2	1968	20	Limon
87	Beauvais-R0	SCPA	60	1967	9	Sablo-limoneux
88	Beauvais-R1	SCPA	60	1967	9	Sablo-limoneux
89	Laval	SCPA	53	1969	21	Limon fin
90	Bignan	CA56	56	1985	8	Limon
91	Pont St Martin	SCPA	44	1963	7	Limon sableux
92	St Symphorien	SCPA	72	1977	11	Sablo-argileux
93	Rennes ENSAR	SCPA	35	1962	8	Limon très sableux
94	Dampierre/Blevy	CA28	28	1982	9	Limon caillouteux
95	Carcarès Ste Croix	INRA	40	1977	16	Sableux
96	St Benoît/Seine	SCPA	10	1976	10	Argilo-calcaire superficiel
97	Yvetot A	ITCF CA	76	1988	5	Limon profond
98	Yvetot B	ITCF CA	76	1987	6	Limon profond
99	Villespy	CAL	11	1973	7	Argilo-calcaire
100	Lasbordes	CAL	11	1973	18	Argilo-calcaire
101	Ribouisse	CAL	11	1973	8	Argilo-calcaire
102	Dax A	SCPA	40	1979	9	Sablo-limoneux
103	Mazères 2	SCPA	9	1966	7	Limon
104	Marignac	SCPA	82	1963	7	Argilo-limoneux
105	Lagardelle/Lèze	SCPA	31	1964	7	Limon grossier
106	Saiguède	SCPA	31	1963	9	Limon
107	Pocancy 1	SCPA	51	1958	9	Craie
108	Pocancy 2	SCPA	51	1958	9	Craie
109	Pocancy 3	SCPA	51	1958	12	Craie
110	Lorigné	CA 79	79	1983	8	Limono-argileux

LISTE DES LABORATOIRES AGREES

Extrait du Journal Officiel du 25-11-1992

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE ET DU DÉVELOPPEMENT RURAL

Arrêté du 27 octobre 1992 fixant la liste des laboratoires agréés pour la campagne 1992-1993

NOR : AGR9202086A

Le ministre de l'agriculture et du développement rural,

Vu l'arrêté du 30 décembre 1986 portant création de l'agrément des laboratoires d'analyses de terre ;

Vu l'arrêté du 8 octobre 1992 portant délégation de signature,

Arrête :

Art. 1^{er}. - Les arrêtés des 2 septembre 1991 et 6 novembre 1991 fixant la liste des laboratoires d'analyses de terre agréés pour la campagne 1991-1992 sont abrogés.

Art. 2. - Les laboratoires suivants sont agréés au titre de la campagne 1992-1993 :

Région Nord - Pas-de-Calais

Laboratoire d'analyses de sols de l'I.N.R.A., 273 rue de Cambrai, 62000 Arras.

Centre d'études et d'analyses agricoles (C.E.A.A.), domaine du lycée agricole de Radinghem, 62310 Fruges.

Région Picardie

Laboratoire de la station agronomique de l'Aisne, rue Fernand-Christ, B.P. 101, 02004 LAON CEDEX.

Laboratoire de chimie de l'union des coopératives agricoles d'alimentation du bétail (U.C.A.A.B.), B.P. 19, 02402 CHÂTEAU-THIERRY CEDEX.

Laboratoire Sicarado, B.P. 313, rue P. -Waguet, 60000 Beauvais.

Région Centre

Laboratoire départemental d'Indre-et-Loire, 14 rue Etienne-Pallu, 37033 TOURS CEDEX.

Laboratoire du centre de recherches et d'analyses agro-alimentaires Franciade (Ceraaf), 11, rue Franciade, B.P. 739, 41007 BLOIS CEDEX.

Laboratoire agronomique et œnologique de la chambre d'agriculture de Loir-et-Cher, 7, rue Porte-Clos-Haut, 41000 Blois.

Laboratoire de la chambre d'agriculture du Loiret, 13, avenue des Droits-de-l'Homme, 45921 ORLÉANS CEDEX 09.

Laboratoire agronomique S.A.S., avenue de la Pomme-de-Pin, Ardon, 45160 Olivet.

Sicagro laboratoire agronomique, 6, rue Jean-Moulin, 45073 ORLÉANS CEDEX 2.

Région Haute-Normandie

Laboratoire Cahn-Arromanches, 12, rue de la Chaîne, 76041 ROUEN CEDEX 3030.

Région Basse-Normandie

Labgrisol, Cidex 06, 14210 Gavrus.

Laboratoire Aglaam, Z.I., avenue de Paris, 50000 Saint-Lô.

Laboratoire Casam, 9, rue de l'Écluse-Chette, B.P. 611, 50211 COUTANCES CEDEX.

Laboratoire C.I.C. du lait de l'Orne, 44-46, rue Ampère, 61000 Alençon.

Région Bretagne

Laboratoire départemental d'analyse des Côtes-d'Armor (L.D.A. 22), Zoopole, B.P. 54, 22440 Ploufragan.

Laboratoire Coopagri-Bretagne, Z.I. de Lanrinou, B.P. 100, 29206 LANDERNAU CEDEX.

Agri-Labo, 5, allée Verte, B.P. 111, 29203 MORLAIX CEDEX.

Laboratoire départemental d'analyses agricoles, avenue des Palmiers, 35270 Combourg.

Laboratoire départemental d'analyses du Morbihan, service sols-fourrages-aliments, 6, avenue Edgar-Degas, Ménémur, 56000 Vannes.

Région Pays de la Loire

Laboratoire central La Noelle-Services, B.P. 102, 44157 ANCENIS CEDEX.

Laboratoire de la station agronomique de Loire-Atlantique, 26, boulevard Victor-Hugo, 44200 Nantes.

Laboratoire vétérinaire départemental de la Mayenne, section sols et fourrages, 224, rue du Bas-du-Bois, B.P. 739, 53018 LAVAL CEDEX.

Laboratoire de la chambre d'agriculture de la Sarthe, 34, rue Paul-Ligneul, B.P. 163, 72004 LE MANS CEDEX.

Région Poitou-Charentes

Laboratoire Centre-Atlantique (L.C.A.), 2, avenue de Fétilly, B.P. 569, 17074 LA ROCHELLE C.T.A. CEDEX 9.

Région Limousin

Laboratoire départemental des services vétérinaires de la Creuse, 2, rue de l'Ancienne-Poudrière, B.P. 289, 23006 GUÉRET CEDEX.

Laboratoire de la chambre d'agriculture de la Haute-Vienne, avenue du Président-Léobardy, 87000 Limoges.

Région Aquitaine

Laboratoire du centre d'études des sols de la chambre d'agriculture de la Gironde, 39, rue Michel-Montaigne, 33290 Blanquefort.

Agronomie 47, laboratoire de la chambre d'agriculture de Lot-et-Garonne, rue de Péchabout, B.P. 349, 47008 AGEN CEDEX.

Région Midi-Pyrénées

Europe-Sols S.A., 45, rue de Gironis, 31100 TOULOUSE CEDEX.

Laboratoire départemental agricole et viticole du Gers, avenue de l'Armagnac, 32800 Eauze.

Laboratoire de la compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne, chemin de l'Alette, B.P. 449, 65004 TARBES CEDEX.

Laboratoire de la chambre d'agriculture de Tarn-et-Garonne, 130, avenue Marcal-Unal, 82017 Montauban.

Région Alsace

Laboratoire Sadef, rue de la Station, Aspach-le-Bas, 68700 Cernay.

Région Champagne-Ardenne

Cama, rue du Château, B.P. 5, 08000 Villers-Semeuse.

Région Bourgogne

Laboratoire départemental de chimie agricole et d'œnologie de Saône-et-Loire, 98, rue Pasteur, 71000 Mâcon.

Laboratoire de la station agronomique de l'Yonne, allée Turenne, 89000 Auxerre.

Région Auvergne

Laboratoire départemental d'analyses de l'Allier, centre de l'agriculture, rue Aristide-Briand, B.P. 98, 03403 YZEURE CEDEX.

Région Rhône-Alpes

Laboratoire coopératif d'œnologie, Le Château, 26790 Suze-la-Rousse.

Cesar, 1, rue Hermann-Frenkel, 69364 LYON CEDEX 07.

Région Languedoc-Roussillon

Laboratoire d'analyse des sols de la chambre d'agriculture de l'Aude, 70, rue Aimé-Ramon, 11000 Carcassonne.

Laboratoire de la société coopérative centrale d'achats et d'approvisionnement, 77, avenue Victor-Dalbiez, B.P. 41, 66027 PÉRI-GNAN CEDEX.

Région Provence-Côte d'Azur

Laboratoire de la société du canal de Provence, B.P. 100, Le Tholonet, 13603 AIX-EN-PROVENCE CEDEX 1.

Art. 3. - Le directeur de l'espace rural et de la forêt est chargé de l'exécution du présent arrêté, qui sera publié au *Journal officiel* de la République française.

Fait à Paris, le 27 octobre 1992.

comifer

Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée

Créé en 1980, le COMIFER est une association sans but lucratif, régie par la loi de Juillet 1901 ; il propose un pôle de rencontre et de dialogue à toutes personnes ou organisations concernées par les sciences et techniques d'application intéressant la fertilisation raisonnée.

MISSION

La mission du COMIFER est d'organiser et de promouvoir une concertation permanente entre les secteurs d'activité concernés par la fertilisation raisonnée, en vue d'encourager les progrès dans ce domaine, en mettant en jeu tous les moyens scientifiques, techniques et pratiques.

La conduite de la fertilisation demeure un domaine complexe où s'impose la concertation à tous les niveaux, pour résoudre dans l'intérêt de l'agriculteur les problèmes nés de l'interaction des facteurs techniques et économiques avec les conditions imposées par le milieu physique et les systèmes agraires, tout en veillant à la conservation des patrimoines "sol" et "environnement".

ACTIVITES

1. Favoriser et développer les contacts et les échanges d'idées entre toutes personnes et tous organismes concernés par une maîtrise aussi complète que possible de la fertilisation et de toutes ses conséquences.
2. Collaborer à l'information du monde agricole en liaison avec les organismes chargés de l'enseignement, de la formation continue et du développement agricole.

3. Organiser des réunions de toutes sortes sur les problèmes de fertilisation, soit directement, soit par l'intermédiaire d'autres organismes ou avec leur collaboration.

4. Collaborer avec les organisations nationales, étrangères ou internationales ayant, en tout ou partie, un objet analogue à celui du COMIFER.

5. Proposer la mise en oeuvre de tous les moyens propres à harmoniser et encourager les progrès touchant la fertilisation raisonnée.

MEMBRES

Les membres sont classés suivant leur origine professionnelle en trois "collèges" :

1er collège - les administrations publiques, les centres de recherche de l'Etat, les établissements d'enseignements, les sociétés savantes.

2è collège - les organisations professionnelles agricoles, qu'elles soient représentatives ou à caractère exclusivement technique.

3è collège - les industries productrices de matières fertilisantes et les structures de distribution de ces produits, ainsi que les industries productrices de matériels de mise en oeuvre de ces produits.

LES GROUPES DE TRAVAIL

L'élément moteur du COMIFER est le groupe de travail qui peut se subdiviser en sous-groupes chargés chacun de concentrer son action sur un thème précis et bien délimité. Le groupe peut avoir une existence temporaire ; il réunit les spécialistes les plus compétents sur le thème choisi.

Chaque groupe fait le point des problèmes à approfondir dans son secteur ; il s'efforce de coordonner les travaux de ses membres dans l'objectif d'aboutir à la cohérence de leurs réponses et résultats, de rechercher les complémentarités possibles et les options intéressantes, de publier les résultats obtenus.

PUBLICATIONS DU COMIFER

- 1er Forum national de la fertilisation - 251 pages - Paris - 21 et 22 janvier 1982.
- 2è Forum national de la fertilisation raisonnée - 51 pages - Toulouse - 22 au 24 janvier 1985.
- 3è Forum national de la Fertilisation raisonnée - 208 pages - Nancy - 22 et 23 juin 1988.
- 1er Forum européen de la fertilisation raisonnée "Quelles fertilisations demain ?" - 239 pages - Strasbourg - 26 et 27 septembre 1991.
- Connaissances nouvelles pour une fertilisation azotée raisonnée - Colloque Académie d'Agriculture COMIFER - C.R. Ac. Ag. de France 73-3.
- Oligo-éléments et monde vivant - Académie d'Agriculture COMIFER - C.R. Ac. Ag. de France - 76-2.
- Interculture et nitrates - 29 janvier 1992 - 157 pages - Ministère de l'Agriculture - DERF.
- Matières organiques et agriculture - Journées communes COMIFER-GEMAS - 16 au 18 novembre 1993.
- Le magnésium en agriculture - 1991 - 270 pages - Edition INRA.
- Etat calcique des sols et fertilité : le chaulage - 1986 - 166 pages - Edition ACTA.
- Oligo-éléments et cultures - 1990 - série de 15 fiches (en collaboration avec la France Agricole).
- Glossaire de la fertilisation NPK - 1993 - 18 pages.

Prix : 50,00 F TTC