



La fertilisation P – K – Mg

Les bases du raisonnement

ÉDITION 2019

LA FERTILISATION P-K-Mg

Brochure éditée par le



Le Diamant A
92909 Paris La Défense Cedex
Tél. : 01 46 53 10 29

contact@comifer.fr
<https://comifer.asso.fr>

Réalisation CIPS
Courriel : studio@cips.fr
Dépôt légal : 4^e trimestre 2019
ISBN : 978-2-910393-10-6
groupecips.com
Achevé d'imprimer en octobre 2019



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

GROUPE PKMg

La fertilisation P – K – Mg

Les bases du raisonnement

COMITÉ DE RÉDACTION

Pascal DENOROY (INRA, UMR ISPA, Bordeaux)
Lionel JORDAN-MEILLE (Bordeaux Sciences Agro, UMR ISPA, Bordeaux)
Stéphanie SAGOT (Laboratoire Départemental d'Analyses et de Recherche LDAR, Laon)

Avec la collaboration du groupe PKMg du COMIFER

COMITÉ DE RELECTURE

Philippe EVEILLARD (Unifa)
Bruno FELIX-FAURE (Galys laboratoire)
Christine LE SOUDER (Arvalis Institut du Végétal)
Sophie DROISIER (COMIFER)

Photo de couverture : Essai de Kerguéhennec
(Chambre d'Agriculture de Bretagne), Bignan (D. Hanocq)

Crédit photos et iconographie : COMIFER et Editions France Agricole

PRÉAMBULE



Le raisonnement de la fertilisation pour les éléments phosphore (P), potassium (K) est effectué en France en suivant des principes essentiellement énoncés à la fin des années 1990 par le COMIFER (Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée). Le document de référence de cette époque, «Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures (1995)» est téléchargeable sur le site web du COMIFER (<https://comifer.asso.fr/fr/publications/les-brochures>).

Sous sa forme pratique et bien connue de «grille COMIFER » de coefficients multiplicatifs des exportations, le raisonnement a été actualisé en 2009. Un état des connaissances a été récemment publié dans l'ouvrage «Guide de la fertilisation raisonnée» (2017) rédigé par un large collectif de spécialistes sous l'égide du COMIFER, et publié par les Editions France Agricole (www.editions-france-agricole.fr).

Cette brochure vise donc à donner, à destination d'un large public, une version résumée et actualisée des documents cités ci-dessus en y ajoutant des éléments relatifs au raisonnement de la fertilité magnésienne. A de nombreux égards en effet, cette dernière dépend de déterminismes similaires à ceux de la fertilité potassique, même si beaucoup moins de références expérimentales sont disponibles pour son raisonnement.

Pour plus de détails, on se reportera à l'ouvrage «Guide de la fertilisation raisonnée».



Crédits photos : de gauche à droite et de haut en bas :

Essai P x K de Folleville à Grignon (C. Montagnier). Essai SUMI AGRO (F. Landais).
Essai Université Gembloux (C. Roisin). Essai Colza en terres de craie (P. Eveillard).

SOMMAIRE



| | |
|-----------------|---|
| PRÉAMBULE | 5 |
|-----------------|---|

| | |
|--------------------|---|
| INTRODUCTION | 9 |
|--------------------|---|

Partie 1 :

BASES SCIENTIFIQUES DU RAISONNEMENT DE LA FERTILISATION

| | |
|--|----|
| 1.1 Nutrition des plantes | 10 |
| 1.2 Caractérisation de l'offre des sols en P-K-Mg | 11 |
| 1.3 Biodisponibilité des éléments apportés par différentes sources (résidus de culture, fertilisants, amendements...) | 14 |

Partie 2 :

MISE EN ŒUVRE DE CES PRINCIPES DANS LA MÉTHODE COMIFER

| | |
|---|----|
| 2.1 Vue d'ensemble | 16 |
| 2.2 L'exigence des cultures | 17 |
| 2.3 La teneur du sol à l'analyse de terre et les seuils de références | 18 |
| 2.4 L'ancienneté du dernier apport de fertilisant | 19 |
| 2.5 La gestion des résidus de cultures | 20 |
| 2.6 Le plafonnement des doses | 20 |
| 2.7 Valorisation des reliquats d'apports antérieurs | 20 |

Partie 3 :

ADAPTATION DU RAISONNEMENT À LA MULTIPLICITÉ DES PRATIQUES

| | |
|--|----|
| 3.1 Les nouvelles matières fertilisantes | 22 |
| 3.2 Localisation des apports | 22 |
| 3.3 Techniques culturales simplifiées | 23 |

Partie 4 :

ANNEXES

| | |
|---|----|
| Annexe 1 : Teneurs-seuils proposées par Arvalis | 24 |
| Annexe 2 : Grille COMIFER 2009 – teneurs des récoltes et coefficients multiplicateurs | 28 |
| Annexe 3 : Exemples de calculs - situations de complexité croissante | 34 |



Crédits photos : de gauche à droite et de haut en bas :

Essai P INRA Pierroton (P. Denoroy). Essai CETA Boutonne, St Félix (P. Denoroy).

Essai K, INRA Pierroton, la modalité 0 a été soufflée par une tempête (L. Jordan-Meille).

INTRODUCTION

Le COMIFER (Comité Français d'Étude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée) propose un mode de raisonnement de la fertilisation concernant les éléments phosphore (P) et potassium (K). Il vise à concilier la maîtrise des coûts de production et la gestion de la fertilité phosphatée et potassique du milieu à moyen terme. La « grille COMIFER de calcul de dose PK » (version 2009) illustrant cette méthode est téléchargeable à partir du site web du COMIFER : <https://comifer.asso.fr/fr/publications/les-brochures.html>.

L'objectif de la gestion de la fertilité du sol est de satisfaire les besoins nutritionnels des plantes en complétant si nécessaire l'offre du sol en éléments nutritifs minéraux, tout en minimisant l'entraînement de nutriments en profondeur hors de l'horizon d'enracinement ou en surface par ruissellement ou érosion.

Il est basé sur 4 critères identifiés comme les plus déterminants : l'analyse de terre, l'exigence des cultures, le passé récent de fertilisation et la gestion des résidus.

Le raisonnement concerne principalement les cultures sur lesquelles il a été construit, c'est-à-dire les grandes cultures, les cultures fourragères, y compris les prairies temporaires assolées de moins de cinq ans. En effet, sur ce type de prairies, l'herbe peut être très jeune, avec peu de matière sèche. Dans ce cas, l'analyse d'herbe peut s'avérer inadaptée. Par extension, on y associe aussi les cultures légumières de plein champ en rotation. Pour les prairies permanentes, l'analyse d'herbe permettant le calcul des indices de nutrition iP et iK semble une méthode préférable pour évaluer et éventuellement modifier les pratiques de fertilisation¹...

Ce document vise à expliciter simplement les bases de ce raisonnement et les évolutions envisageables. Pour des informations plus détaillées, on se reportera à l'ouvrage du COMIFER « Le Guide de la Fertilisation Raisonnée » (éditions France Agricole, 2017), nommé GFR dans la suite de ce document.

¹ Voir brochure « L'analyse d'herbe : un outil pour le pilotage de la fertilisation phosphatée et potassique des prairies naturelles et temporaires » <https://comifer.asso.fr/fr/publications/les-brochures.html>

BASES SCIENTIFIQUES DU RAISONNEMENT DE LA FERTILISATION

Quelles sont les connaissances scientifiques qui cadrent les principes du raisonnement ? Dans l'ensemble des connaissances disponibles, le COMIFER a fait le choix de critères et paramètres jugés prioritaires, déterminants et opérationnels.

1.1 NUTRITION DES PLANTES

1.1.1 Qu'est-ce qu'un « besoin » ?

L'atteinte du rendement potentiel permis par le contexte pédoclimatique nécessite que les besoins lors des phases cruciales de mise en place des déterminants² du rendement soient satisfaits. Ainsi, la mise en place de la surface foliaire est toujours déterminante, et selon les cultures, la floraison, la fécondation ou la croissance des organes récoltés vont être des étapes-clés particulièrement sensibles.

Par ailleurs, il y a en continu des besoins instantanés plus ou moins impactant sur le rendement, qui sont liés à l'activité photosynthétique de la plante. Compte tenu de l'impossibilité de connaître précisément les capacités d'approvisionnement en minéraux des sols, croisées avec la surface d'absorption des racines, cette notion de besoin instantané ne peut pas être abordée explicitement dans le raisonnement de la fertilisation ni même en pratique dans les interventions en culture. Dès lors, on considère que la quantité totale prélevée en situation optimale (également appelée « besoins totaux »), que l'on pourra décomposer entre quantité exportée et quantité restituée (figure 1), s'effectuera à partir d'un flux d'éléments biodisponibles (GFR chap. 3.III, chap. 6.I, chap. 7.III) complété par une éventuelle fertilisation.

Avec les éléments P, K, Mg, la production de biomasse croît avec l'offre du sol, jusqu'à un « seuil de non réponse » où le rendement plafonne et où l'augmentation de l'offre en éléments ne contribue plus qu'à du prélèvement dit « de luxe » car sans bénéfice en termes de rendement (figure 2). La réalisation du rendement potentiel signifie que, compte tenu de la concentration de l'élément dans le sol et de la capacité des racines à le prélever, l'offre a été suffisante par rapport à la demande lors des phases cruciales déterminant le rendement. L'offre du sol (axe horizontal de la figure 2) sera évaluée par un indicateur de biodisponibilité (GFR chap. 7.III).

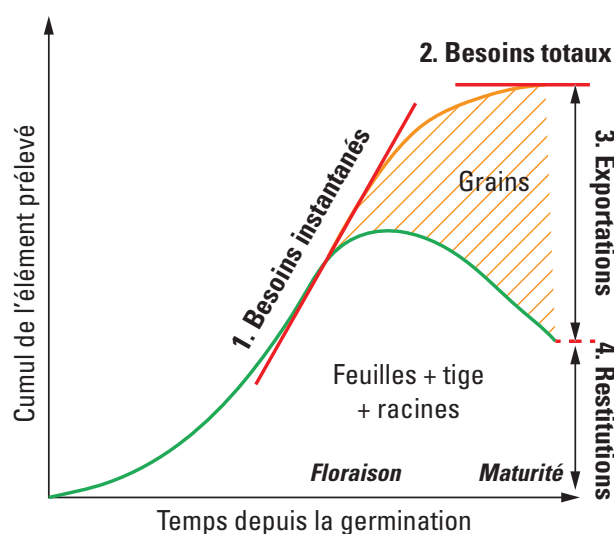


Figure 1. Courbe de cumul des quantités prélevées, avec définition des besoins instantanés (1), des besoins totaux (2), des quantités exportées (3) et des restitutions (4).

² Principaux paramètres de la plante qui influencent le rendement : enracinement, indice foliaire, durée de vie des feuilles, composantes du rendement, etc. ...

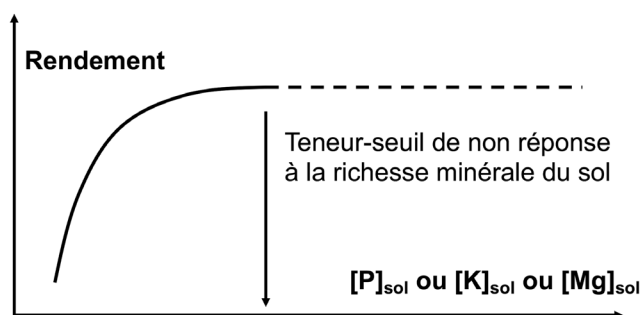


Figure 2. Courbe de réponse d'une culture à une disponibilité minérale croissante du sol. Dans le cas des minéraux cités, la courbe ne re-diminue généralement pas aux fortes teneurs du sol.

Les courbes de réponses du rendement à l'offre du sol rendent compte de manière simple de multiples mécanismes, physiologiques déterminant la demande de la plante et bio-géochimiques déterminant l'offre du sol. Les déficiences minérales agissent sur : la multiplication et l'allongement cellulaire (respectivement P et K), la mise en réserve et le transfert d'énergie cellulaire (P), la photosynthèse (Mg, N, ...), le transport des sucres (K, Mg), etc. (GFR chap. 3.II)... Les carences en minéraux pénalisent généralement la croissance des organes aériens au profit des racines - au moins temporairement - ce qui suffit parfois à la plante pour surmonter une carence de courte durée en augmentant sa capacité à prélever dans le sol.

Pour un sol et un minéral donné, le seuil de non réponse, ainsi que la pente de la courbe en deçà du seuil vont dépendre de la capacité des plantes à satisfaire plus ou moins facilement leurs besoins en minéraux et à pouvoir remobiliser leurs réserves vers les zones en croissance. La sensibilité de la plante à la déficience, également nommée « exigence », peut ainsi dépendre :

- de la taille relative du compartiment racinaire par rapport à celui des parties aériennes,
- de l'environnement chimique et biologique créé par les racines, plus ou moins favorable à la mobilisation des minéraux,
- des capacités d'absorption propres des racines,
- des aptitudes à la mycorhization³, etc.

1.2 CARACTÉRISATION DE L'OFFRE DES SOLS EN P-K-Mg

1.2.1 De quelles espèces chimiques de phosphore, potassium et magnésium parle-t-on ?

Les plantes s'alimentent en éléments nutritifs sous leur forme ionique présente dans la solution du sol. Pour K

et Mg, il s'agit des ions K^+ et Mg^{2+} .

Pour P, il s'agit des ions de la famille des phosphates ($H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} , en proportion variable en fonction du pH du sol) qui sont pratiquement la forme stable très dominante du phosphore dans la biosphère. Les plantes n'absorbent pas les composés organiques, qui doivent être d'abord minéralisés par l'activité biologique des sols (vers, arthropodes, bactéries, champignons...). Les phosphates en solution sont généralement en équilibres dynamiques avec des formes sorbées⁴ sur la matrice du sol, qui permettent de réapprovisionner la fraction disponible dans la solution du sol.

Ainsi, on peut schématiquement répartir les cations tels que K^+ et Mg^{2+} , dans 4 compartiments du sol, par ordre de quantités croissantes (GFR chap. 5.V, VI), et entretenant entre elles des relations d'équilibres dynamiques : la fraction dissoute dans la solution du sol, celle prenant place sur la capacité d'échange cationique (CEC) du sol, celle occupant les espaces interfoliaires des argiles et enfin celle prenant part à la constitution-même de la roche mère non dégradée. Le K et Mg de ces 4 compartiments prennent les noms de « en solution », « échangeable », « fixé » et « minéral », respectivement. Ce modèle de classification géochimique sera directement utilisé pour la définition d'un indicateur de biodisponibilité des cations.

En revanche, pour le phosphore, il existe des formes minérales multiples dans le sol : outre le P en solution, ultra minoritaire, on retrouve du P lié (fixé) aux hydroxydes de fer et d'aluminium, aux argiles, au calcium, ou cristallisé au sein de minéraux généralement calcaires (GFR chap. 5.IV). Cette classification complexe n'a pas d'utilité opérationnelle pour la définition d'un indicateur de nutrition des plantes, c'est pourquoi on considérera globalement la part de ce phosphate qui peut passer de la phase solide à la solution du sol sous le nom de « P diffusible ». La quantification précise de cette fraction fait encore l'objet de nombreuses recherches. Aussi, en pratique, un indicateur de nutrition passera par une extraction chimique.

Quel que soit l'élément (P, K ou Mg), on peut schématiquement représenter les stocks du sol sous la forme d'une pyramide au sommet de laquelle se trouvent les formes directement assimilables (les éléments sous forme ionique de la solution du sol), elles-mêmes en équilibres dynamiques avec des formes dont la mise en solution ne relève que d'un simple échange ionique (K, Mg), ou d'une désorption peu énergivore (P). Ces compartiments d'ions échangeables ou facilement désorbables sont eux-mêmes en équilibre avec d'autres fractions minéralogiques du sol, mais moins réactives, et ainsi de suite (fig. 3).

³ Associations de champignons aux racines leur permettant d'améliorer leur surface de prélèvement.

⁴ Le terme « sorbé » recouvre l'ensemble des mécanismes de liaison à faible énergie avec les particules du sol (absorption, adsorption, échanges d'ions...)

On qualifiera de «bio- ou phyto- disponible» la fraction d'éléments qui pourra participer effectivement à la nutrition d'une culture, c'est à dire la part de minéraux qui peut passer en solution sur la durée d'une culture. Pour K et Mg, les espèces chimiques considérées comme biodisponibles seront les fractions en solution et échangeables voire un peu au-delà. Pour le P, on ne peut pas *a priori* connaître la liste des espèces chimiques qui contribueront à l'alimentation des plantes.

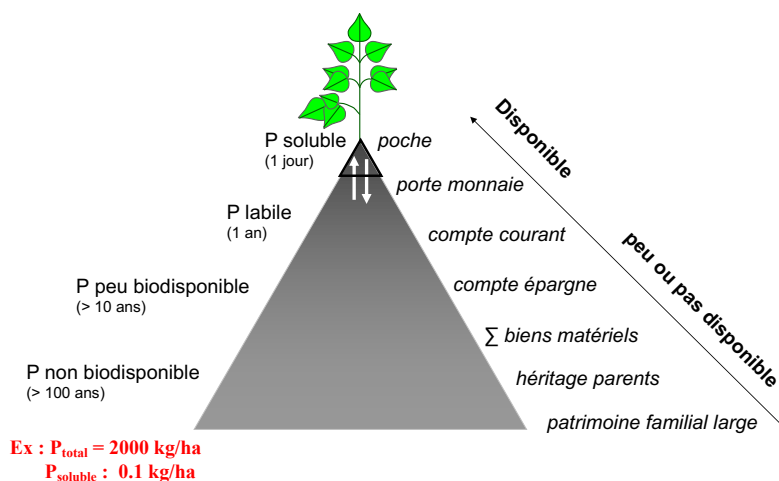


Figure 3. Représentation schématique des différentes espèces chimiques en solution, et analogie avec la disponibilité en argent en fonction des différentes localisations de ses économies

1.2.2 Pouvoir fixateur, pouvoir tampon, rétrogradation

L'équilibre entre les différentes espèces chimiques dans le sol se réalise plus ou moins au détriment des espèces en solution. Selon leurs origines et leurs modalités d'évolution, certains sols sont composés d'une majorité de constituants solides minéraux offrant une très forte affinité chimique avec les minéraux P, K ou Mg. Ces sols sont dits à «fort pouvoir fixateur». Par exemple, dans ces conditions, un engrais soluble peut quitter la solution du sol pour se «fixer» sur la phase solide, en forte proportion (> 90%) et à l'échelle de quelques heures selon les conditions d'humidité. Typiquement, l'argile pour les cations (K, Mg), les oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium et le carbonate pour le phosphate, sont des constituants impliqués dans ce pouvoir fixateur, et donc de forts compétiteurs pour les racines et les micro-organismes qui se nourrissent dans la solution du sol. Cette «fixation» est néanmoins largement réversible, les sols à fort pouvoir fixateur offrant réciproquement des capacités de réapprovisionnement de la solution du sol lorsque celle-ci vient à diminuer, du fait par exemple du prélèvement par les plantes ou de la dilution par l'eau de pluie. La réversibilité (plus ou moins complète

suivant les sols), de cette «fixation» fait qu'on peut préférer parler de «pouvoir tampon» des sols vis-à-vis de P, K. En d'autres termes, le pouvoir tampon est la capacité du sol à maintenir la composition de la solution à l'équilibre après perturbation (prélèvement, apport).

Cependant, concernant le cas spécifique de la biodisponibilité du phosphore dans les sols calcaires, la réversibilité des processus de cristallisation est faible, ce qui aboutit à faire sortir ce composé des compartiments potentiellement mobilisables pour la nutrition des plantes. On désigne ce phénomène par le terme de «rétrogradation» des formes du P.

1.2.3 Indicateurs d'offre du sol

La dynamique des échanges entre les compartiments solubles dans l'eau et échangeables des cations K et Mg justifie de considérer ces compartiments, ensemble, comme un indicateur pertinent de biodisponibilité. En France, on utilise une extraction à l'acétate d'ammonium 1M (molaire) à pH=7 pour mesurer la fraction échangeable (et soluble) de K et Mg dans les conditions de la méthode AFNOR NF X 31-108. Les teneurs mesurées sont à interpréter de manière relative, les quantités réellement prélevées par les plantes étant largement différentes des quantités extractibles mesurées par l'acétate d'ammonium.

Concernant le phosphore, l'estimation de la quantité pouvant passer en solution et être absorbée par les plantes va se faire par des extractions chimiques «ménagées» en ce sens que l'on ne s'attaque pas à la somme des espèces P du sol, mais à une quantité représentative de ce qui est susceptible d'être solubilisé. En France, les réactifs utilisés agissent par complexation cationique, échange d'anions ou dissolution acide, avec les méthodes Olsen (1954), Joret Hébert (1955) et Dyer (1894) respectivement. Ces mécanismes permettent de libérer du P dans la solution, à l'instar de ce qui a également lieu au voisinage des racines.

Les extractants chimiques ne sont pas capables de quantifier directement les mécanismes suivants, pourtant à l'œuvre dans la nutrition des plantes :

- minéralisation, pendant la période de prélèvement des plantes, des fractions organiques issues de l'humus ou des résidus de culture ;
- effets rhizosphériques (exsudations, excréations de protons, ...) autres que ceux «mimés» par les réactifs ;

- libération du K et du Mg fixés dans les feuillets argileux ;
- désorption des minéraux sous l'effet de prélèvement par les racines dans la solution du sol (effet « puits », pouvoir tampon du sol), transfert suivant un gradient de concentrations décroissantes.

Outre les justifications chimiques du choix de ces extractants, les relations empiriques établies dans de nombreuses situations, entre quantités extraites par les plantes et par les réactifs utilisés sont la principale validation de ces méthodes (GFR chap. 7.III), de même que les relations empiriques établies entre rendement des cultures et quantités extraites à l'analyse de terre, au moins dans une certaine gamme de valeur de ces analyses.

1.2.4 Synthèse : En quoi P, K et Mg sont-ils ressemblants et dissemblables (tableau 1) ?

Les éléments P, K et Mg possèdent en commun un cycle biogéochimique démarrant dans le compartiment des roches (altération des minéraux primaires), passant par le compartiment biologique par absorption racinaire, pouvant retourner au sol par la voie des résidus de culture, des déjections. Ils peuvent quitter l'agrosystème par érosion et lixiviation (très peu pour le P), sachant qu'aucun des 3 éléments n'a de forme gazeuse. La taille de leur compartiment « particulaire » (c'est-à-dire lié à la phase solide), est infiniment plus grande que celle de leur compartiment soluble (tableau 1). Compte tenu du rapport entre stock de minéraux dans les sols et concentrations dans les plantes, les éléments P et K sont relativement plus limitants pour la croissance des plantes que l'élément Mg. On ne note pas d'enjeux environnementaux avec Mg et K, contrairement au P qui peut provoquer l'eutrophisation des eaux en milieu continental. Quant aux normes de potabilité, elles sont un peu théoriques : pour le P, aucune eau même d'égout n'atteint de telles teneurs, pour Mg et K, des eaux minérales célèbres dépassent ces teneurs et en font même un argument de vente ...

| | P | K | Mg |
|---|--|---|---|
| Source principale | Roches ignées ou sédimentaires | Roches silicatées | Carbonates / roches silicatées |
| Stocks totaux dans les sols naturels et agricoles | 2,5 - 5 t ha ⁻¹ | 10 - 20 t ha ⁻¹ | 10 - 40 t ha ⁻¹ |
| Concentration dans la solution du sol agricole et non agricole | 0.02 - 1 mg L ⁻¹ | 1 - 20 mg L ⁻¹ | 2 - 50 mg L ⁻¹ |
| Aptitude à la lixiviation | - | + | ++ |
| Aptitude à la sorption-désorption | +++ | +++ | + |
| Concentrations dans les plantes (% de la matière sèche) | 0,3% | 3% | 0,40% |
| Exportations | | | |
| - Grandes cultures | 15-25 kg.ha ⁻¹ .an ⁻¹ | 80-160 kg.ha ⁻¹ .an ⁻¹ | 10-25 kg.ha ⁻¹ .an ⁻¹ |
| - Maraîchage, fourrages | 20-40 kg.ha ⁻¹ .an ⁻¹ | 200-300 kg.ha ⁻¹ .an ⁻¹ | 25-50 kg.ha ⁻¹ .an ⁻¹ |
| Parties accumulatives des plantes | Fruits (graines) | Feuilles, tiges, fruits | Feuilles |
| Norme Eau Potable | 2,2 mg L ⁻¹ | 12 mg L ⁻¹ | 50 mg L ⁻¹ |
| Enjeux agronomiques et environnementaux | - Excès : Risques d'eutrophisation des milieux lentiques continentaux - Déficience : perturbations de nombreuses fonctions biologiques des végétaux, notamment leur division cellulaire | - Excès : blocage Mg - Déficience : carences minérales (transport sucres, régulation stomatique) | - Excès : moins flocculant que Ca, mais occupant les mêmes sites, la stabilité structurale du sol sera plus faible - Déficience : carences minérales (chlorophylle, transport sucres), tétanie d'herbage |

Tableau 1 : comparaison des grands traits de la dynamique des éléments P, K et Mg

NB : toutes les quantités sont exprimées en P, K et Mg et non P₂O₅, K₂O ou MgO (1 P <=> 2.29 P₂O₅ ; 1 K <=> 1.20 K₂O ; 1 Mg <=> 1.66 MgO).

1.3 BIODISPONIBILITÉ DES ÉLÉMENTS APPORTÉS PAR DIFFÉRENTES SOURCES (RÉSIDUS DE CULTURE, FERTILISANTS, AMENDEMENTS ...)

Le cas des engrais minéraux est le plus simple : seule compte la teneur totale, soluble généralement dans l'eau, des engrais minéraux. Dans le cas du phosphore, la réglementation classe les engrais phosphatés suivant leur solubilité dans des réactifs conventionnels. La solubilité dans l'eau indique une disponibilité immédiate, celle dans le citrate d'ammonium neutre indique une libération rapide. La solubilité dans d'autres réactifs (par exemple acide formique à 2% cité dans le cas des phosphates naturels) indique une disponibilité à l'échelle de la culture, qui dépend des conditions d'acidité du sol dans lesquelles l'engrais est apporté (GFR chap. 8.I).

Pour les résidus de culture⁵, leur contenu en minéraux est disponible dans les semaines ou mois suivant l'enfouissement, dépendant en particulier des conditions de broyage et d'enfouissement qui facilitent la dégradation. Cette disponibilité est pratiquement immédiate pour K qui, restant sous forme ionique dans les plantes, n'est pas lié aux molécules organiques. Pour les autres minéraux dont la fraction organique est variable, cette disponibilité nécessite un processus un peu plus long comportant d'abord une dégradation suivie d'une minéralisation des résidus.

Dans le cas des engrais et amendements organiques, on est dans une situation intermédiaire entre les engrais et les résidus : le K est immédiatement disponible, Mg et P sont majoritairement présents sous forme minérale. La disponibilité du P organique complémentaire va dépendre de la composition globale de l'amendement (notamment proportion C/N/P), relativement à celle de l'humus.

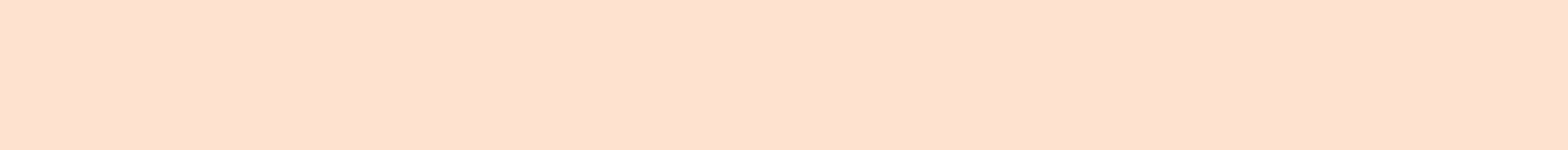
Comme pour l'azote, on peut caractériser la valeur fertilisante d'une matière fertilisante par le coefficient réel d'utilisation (CRU), le coefficient apparent d'utilisation (CAU) et le coefficient équivalent engrais (Keq). Le CRU représente la fraction de l'apport d'un élément nutritif effectivement prélevé par la culture, ce qui nécessite l'utilisation d'élément marqué isotopiquement pour être calculé ; il est donc de fait rarement mesuré. Le CAU représente le rapport du supplément d'élément fertilisant prélevé entre une culture fertilisée par rapport à la même culture non fertilisée (témoin), sur la quantité totale apportée de l'élément fertilisant. Quant au coefficient équivalent engrais, il correspond au rapport du CAU d'un fertilisant minéral ou organique à celui de l'engrais minéral soluble dans l'eau servant de référence (superphosphate triple pour le P, nitrate d'ammonium pour l'N).

Le CAU dépend de la date d'apport, de la culture et de la durée de minéralisation considérée. A long terme, tout le P d'un produit organique finira par être disponible, à l'exception des formes minérales insolubles qu'il pourrait contenir (cas de certaines fientes riches en CaCO_3 avec possible précipitation du P).

L'évaluation des qualités fertilisantes des engrais et amendements organiques devrait tenir compte de la cinétique de minéralisation du P (estimation en conditions normalisées de laboratoire).

Au champ, les « arrières effets » des apports organiques peuvent être pris en compte par des analyses de terre régulières (de l'ordre de tous les 5 ans).

⁵Teneurs en P, K, Mg des organes végétaux récoltés, COMIFER 2007



MISE EN ŒUVRE DE CES PRINCIPES DANS LA MÉTHODE COMIFER

2.1 VUE D'ENSEMBLE

Dans le raisonnement COMIFER relatif au calcul des doses à apporter à une culture (GFR chap. 7, I.V), 4 grands déterminants sont pris en compte, permettant la succession des phases de diagnostic, de préconisation totale et d'ajustement de la dose d'engrais minéraux (figure 4) :

- l'exigence des cultures
- la teneur du sol (analyse de terre⁶) comparée à des seuils de référence
- l'ancienneté du dernier apport de fertilisant minéral ou organique (passé récent de fertilisation)
- la gestion des résidus de la culture précédente.

Ces déterminants permettent d'évaluer un coefficient multiplicatif de l'exportation prévisionnelle d'élément par la culture. Ce coefficient pourra prendre des valeurs de 0 («im passe annuelle») à plus de 3 dans des conditions de nutrition très défavorables. L'exportation est estimée par le produit du rendement prévu (grains pour les grandes cultures céréalières et oléo-protéagineuses, récolte en matière sèche pour les cultures fourragères), par la teneur des organes végétaux exportés. Des valeurs par défaut de teneur minérale sont proposées dans le document du COMIFER de 2007, «Teneurs en P, K, Mg des organes végétaux récoltés». En cas d'exportation des pailles, une fertilisation de compensation peut être ajoutée à la culture suivante si la teneur du sol est jugée insuffisante.

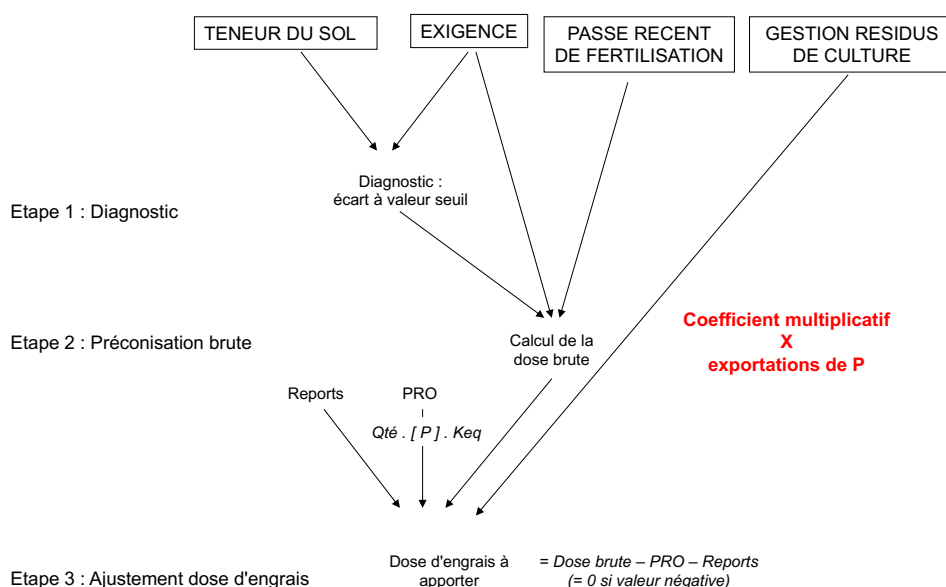


Figure 4 : représentation schématique du raisonnement COMIFER de la fertilisation P K. PRO : Produits Résiduaires organiques - Qté : masse de PRO apportée - [P] : concentration de P dans le PRO - [K] : concentration de K dans le PRO - Keq : coefficient équivalent engrais du P (celui du K est considéré égal à 1)

Report = éventuelle quantité excédentaire de fertilisant apportée les années précédentes ; cf. § 2.7

La grille COMIFER est donc une grille de coefficients multiplicatifs (Grille 2009 en annexe 2) :

Dose conseillée = quantité exportée prévue * coefficient multiplicatif des exportations

Compte tenu des similitudes de dynamique entre le K et le Mg dans le sol, un raisonnement similaire à celui du K pourrait être utilisé pour le Mg. Il n'est pas encore implémenté faute de références.

Le raisonnement de la fertilisation PK se distingue en particulier de celui de la fertilisation azotée sur deux critères :

- il n'intègre pas l'aspect qualitatif des récoltes ; les connaissances des effets de la nutrition P K Mg sur la qualité sont encore trop

⁶ Le diagnostic est établi sur la base d'un référentiel d'essais régulièrement labourés

lacunaires pour que ce critère soit pris en compte dans les règles de la fertilisation à l'exception de quelques productions. Par exemple, dans le cas de la pomme de terre, la nutrition en potassium influencerait les conditions de conservation des tubercules, celle en magnésium jouerait sur l'extractibilité des sucres ; de même, pour les fourrages, leur valeur nutritionnelle est dépendante en partie de leurs teneurs en P, K et Mg.

- la minéralisation nette (minéralisation brute - organisation) de P du compartiment de la matière organique du sol (MOS) est négligeable à l'échelle de temps du suivi analytique des sols. On néglige donc la libération de P par minéralisation de la MOS.

2.2 L'EXIGENCE DES CULTURES

Les résultats d'essais aux champs ont montré que toutes les cultures ne réagissent pas de la même façon en situation de déficience en élément nutritif. Les cultures pour lesquelles le rendement est relativement plus impacté sont considérées comme « exigeantes ».

Ceci peut se visualiser par les niveaux relatifs (entre espèces) des indices de rendement⁷ (IR) des traitements non fertilisés, en situation de carence. Pour visualiser la notion d'exigence des espèces cultivées, on a représenté en figure 5 l'indice de rendement du traitement P0 (aucun apport de P) par rapport au traitement P2 (fertilisation abondante, double de l'exportation par les récoltes). Par souci de lisibilité, les noms des cultures ne sont pas tous reportés. Alors que le sol s'appauvrit avec le temps (les exportations minérales n'étant pas compensées), on constate que certaines cultures (Ha=haricot ; PdT = pomme de terre ; Mou = moutarde) vont présenter des pertes de rendement plus fréquentes et plus fortes (IR plus bas) que d'autres cultures (B= blé tendre ; M= maïs grain).

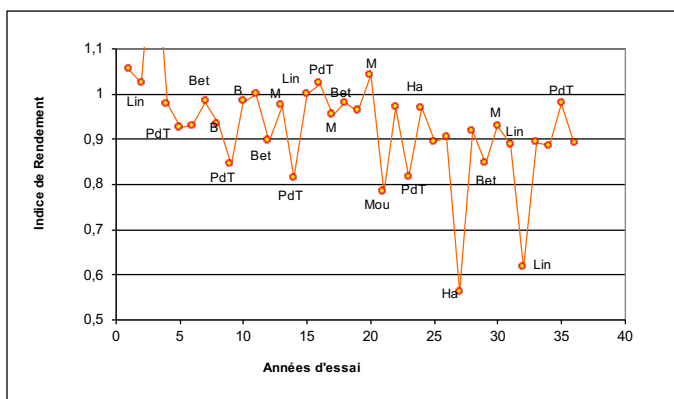


Figure 5 : variabilité des indices de rendement (IR) de diverses cultures installées sur les parcelles sans fertilisation relative au rendement des parcelles fortement pourvues en P. Essai de longue durée P de Versailles comparant les doses P0 aux doses P2 (GFR chap. 7.4).

⁷ Indice de rendement : rapport du rendement d'un traitement au rendement du traitement non limité pour l'élément considéré

Elles sont donc dites plus « exigeantes ». La betterave (Bet) ou le lin sont ici dans une situation intermédiaire.

Une autre visualisation des exigences relatives des cultures (en fait symétrique de la précédente) consiste à représenter et comparer leur perte relative (%) de rendement par rapport aux mêmes cultures non limitées en élément nutritif (figure 6).

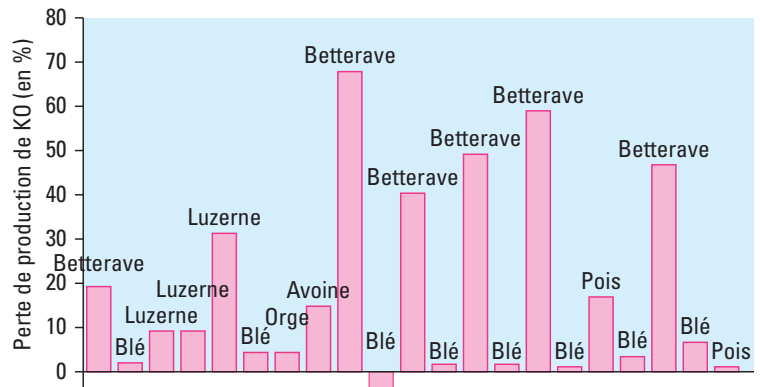


Figure 6 : Pertes de production du traitement KO (absence de fumure potassique) par rapport à K1 (100 kg K₂O ha⁻¹ an⁻¹) sur l'essai de Saint-Jean de Moivre (51) sur la succession culturale de 1968 à 1988. (SCPA) (GFR chap 7.4).

La notion d'exigence dépend de la nature des organes récoltés. Ainsi la biomasse totale du maïs (maïs fourrage) est plus affectée par une déficience en P que le rendement en grain : le maïs fourrage est donc plus exigeant en P que le maïs-grain. La notion d'exigence n'est pas reliée à la quantité ou à la rapidité de prélèvement par les plantes. Elle exprime la résultante d'un ensemble de mécanismes impliqués dans le prélèvement des minéraux dans le sol et leur utilisation dans la plante, dont l'articulation d'ensemble n'est pas encore totalement élucidée.

Le critère qui permet de quantifier cette exigence est la perte relative de production :

(rendement maximum – rendement réel sous limitation en nutriment) / rendement maximum

Pour estimer les exigences relatives entre cultures, on doit comparer ces pertes relatives pour des niveaux d'offre déficiente du sol similaires puisque les pertes de rendement augmentent quand la déficience s'aggrave.

| | |
|-----|--------------------|
| B | blé tendre |
| Bet | betterave sucrière |
| Ha | haricots |
| Lin | lin |
| M | maïs grain |
| Mou | moutarde |
| PdT | pomme de terre |

Pour classer les multiples espèces cultivées en France sur des aires de répartitions différentes, il est possible d'utiliser une espèce de référence largement répandue sur le territoire. Le blé tendre ou le maïs sont ainsi des cultures toutes désignées. Il est également nécessaire que chaque culture classée soit représentée dans une gamme suffisante de sols, voire de climats, pour éviter des confusions d'effets.

Du fait de l'aspect continu du classement des espèces entre elles, le nombre de catégories retenu est arbitraire. La synthèse des comparaisons entre cultures a permis de proposer un classement des cultures en 3 catégories pour chaque élément (tableaux 2 et 3).

| | |
|------------------|---|
| Exigence élevée | Betterave à sucre, colza, luzerne, pomme de terre |
| Exigence moyenne | Blé dur, maïs fourrage, orge, pois, ray-grass, sorgho, blé de blé |
| Exigence faible | Avoine, blé tendre, maïs grain, soja, tournesol |

Tableau 2 : Classement des cultures selon leur exigence vis-à-vis du phosphore, proposé par le COMIFER (1995)

| | |
|------------------|---|
| Exigence élevée | Betterave à sucre, pomme de terre |
| Exigence moyenne | Colza, luzerne, maïs grain, maïs fourrage, pois, ray-grass, soja, tournesol |
| Exigence faible | Avoine, blé tendre, blé dur, orge, sorgho |

Tableau 3 : Classement des cultures selon leur exigence vis-à-vis du potassium, proposé par le COMIFER (1995)

Ce classement permet de proposer des conseils de fertilisation d'autant plus élevés que l'espèce concernée s'avère sensible à la déficience de l'offre du sol, dans une optique de sécurisation du rendement.

2.3 LA TENEUR DU SOL À L'ANALYSE DE TERRE ET LES SEUILS DE RÉFÉRENCES

Une analyse de terre récente est indispensable au raisonnement de la fertilisation en P, K et Mg. Pour le phosphore, il existe en France plusieurs méthodes analytiques qui donnent des résultats en valeur très différents pour un même échantillon de terre. Il faut veiller à l'interprétation des chiffres qui doit être toujours relative à la même méthode analytique. Les seuils utilisés dans la grille COMIFER sont liés au type d'essais qui ont été exploités pour l'élaboration de ce

schéma de raisonnement, avec leurs éventuels biais expérimentaux.

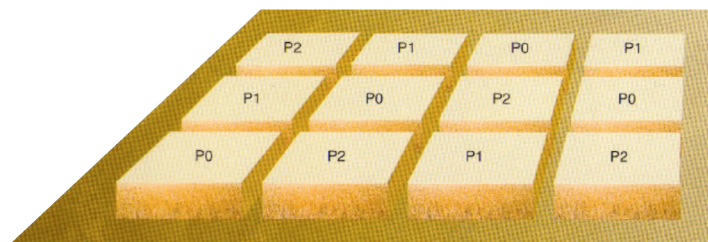


Figure 7 : dispositif expérimental type « Relance Agronomique » exploité pour la conception de la grille COMIFER : un traitement en absence totale d'apport (P0), un traitement avec fertilisation annuelle de l'ordre des exportations annuelles par les récoltes (P1) un ou des traitements plus élevés (P2 = deux fois P1 etc., .. P3). Les traitements sont répétés pour permettre l'analyse statistique des résultats. Des essais similaires ont été conduits pour K.

Dans ce protocole d'essais de longue durée, un témoin P0 (resp. K0) ne reçoit aucune fertilisation, un traitement P1 (resp. K1) reçoit une fertilisation équivalente à l'exportation par les récoltes, et des traitements P2 (resp. K2) voire P3 (resp. K3) reçoivent des traitements multiples de P1 (resp. K1). Les traitements X2 ou X3 sont assurément non déficients, les traitements X1 peuvent être déficients suivant les conditions initiales de l'essai ou l'exigence de la culture, les traitements X0 conduisent à plus ou moins long terme à des situations déficientes si elles ne l'étaient pas initialement.

Le seuil d'impasse⁸ (usuellement noté Timp ou Timpasse) est défini comme le niveau d'offre du sol en élément au-delà duquel l'absence de fertilisation n'induit aucune perte sensible de rendement. En pratique, il est calculé à partir de la perte de production⁹ (nommée aussi «réponse culturale») du seul traitement non fertilisé P0 ou K0, par rapport au rendement maximal de l'essai. Pour le paramétrage de base de la grille COMIFER, on fixe la limite comme étant le niveau de teneur du sol au-dessus duquel la perte de production n'excède jamais 10 % (dans la totalité des situations expérimentales explorées).

La figure 8 représente le critère proposé par le COMIFER en 1993 pour définir le «seuil d'impasse» à partir de données expérimentales exprimées en pertes relatives du rendement («réponse culturale») par rapport au maximum de rendement de l'année. L'intersection des deux lignes bleues visualise la situation (point expérimental) au-delà de laquelle la perte de rendement n'est jamais supérieure à 10 % du maximum. Le seuil d'impasse (teneur minimale en P du sol acceptable en situation sans apport) est déduit par l'abscisse de la ligne verticale : dernier point avec une perte de rendement > 10 %. Ce critère est très sécuritaire puisqu'on définit le seuil de référence à partir du pire cas recensé.

⁸ Pour un type donné d'analyse de terre

⁹ cf. paragraphe 2.2

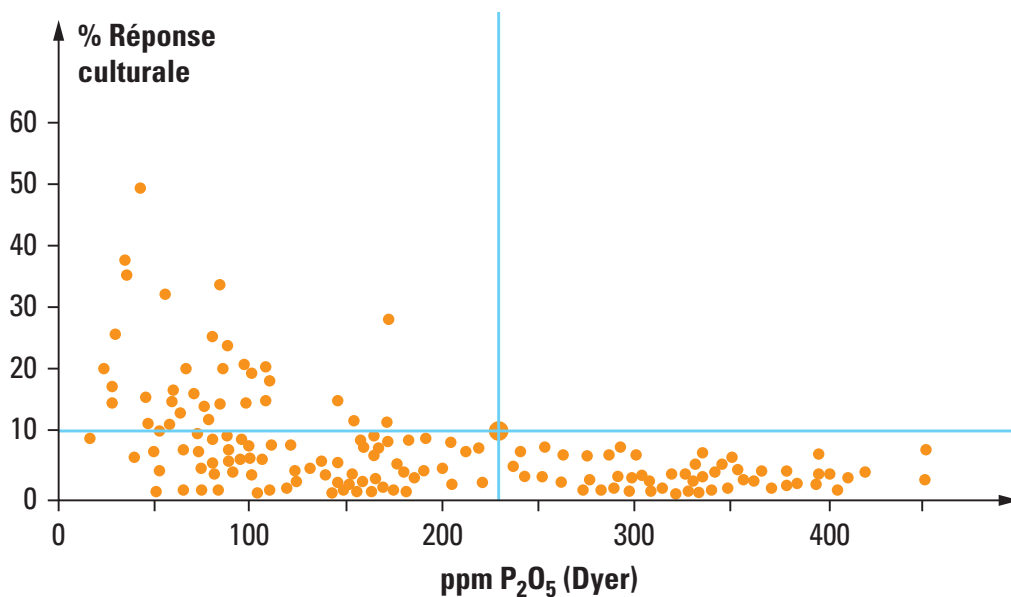


Figure 8 : représentation de la procédure de détermination du seuil d'impasse pour la grille COMIFER. Cas de cultures peu exigeantes en sol limoneux. Le % de réponse culturale représente la perte du rendement du traitement P0 relativement au rendement maximum de l'essai P2.

Pour évaluer la gravité d'un état de déficience du sol à partir de l'analyse de terre, on a défini le « seuil de renforcement » (ou Trenf ou Trenforcé) de façon similaire au « seuil d'impasse », en considérant la comparaison des traitements intermédiaires (P1 ou K1) aux traitements les plus fertilisés (P2 ou K2). En d'autres termes, c'est le niveau de disponibilité d'élément dans le sol en dessous duquel un apport de fertilisant égal à l'exportation (théorique) par la récolte ne suffit pas à retrouver le rendement potentiel.

La valeur du seuil analytique « de renforcement » est définie comme celle au-delà de laquelle la perte de rendement du traitement X1 (relativement au traitement X2) n'excède jamais 10 %.

Ces seuils¹⁰ peuvent prendre des valeurs différentes suivant le niveau d'exigence des cultures. Un traitement des données des nombreux essais de longue durée a permis de faire une première proposition de teneurs indicatives, constituant une base préalable à la régionalisation.

Certains seuils repères ont été proposés en sus des seuils d'impasse et de renforcement¹¹ pour permettre une évolution plus progressive des coefficients multiplicateurs (limitation des effets de marche autour des seuils).

2.4 L'ANCIENNETÉ DU DERNIER APPORT DE FERTILISANT

Comme indiqué dans la partie 1, des apports de fertilisants anciens tendent à se diluer dans la phase solide du sol, voire y subir des évolutions chimiques qui les rendent moins biodisponibles avec le temps. On parle alors de vieillissement de l'engrais dans le sol. Les apports anciens de nutriments sont moins biodisponibles que des apports récents. En d'autres termes, la fertilité du sol diminue dans la mesure où une partie des apports peuvent passer sous une forme peu soluble ou tout au moins sous une forme pour laquelle la diffusion vers la solution du sol sera plus lente.

Si une analyse de terre toute récente doit permettre d'estimer un état actuel de disponibilité des éléments dans le sol, on doit parfois raisonner sur la base d'une analyse datant de quelques années¹². Dans ce cas, même si elle serait à peine détectable à l'analyse, la diminution de biodisponibilité peut impacter le rendement. Bien que ce phénomène semble dépendre beaucoup du type de sol en cause, on s'en prémunit en augmentant le coefficient multiplicateur¹³ suivant l'ancienneté du dernier apport de fertilisant.

¹⁰ Qui pour la plupart de ceux utilisés actuellement, ont été établis par l'ITCF devenu Arvalis, par régionalisation de valeurs guides proposées par le COMIFER en 1993 : www.arvalis-infos.fr

¹¹ Seuil Impasse \pm 10 %, 2x ou 3x seuil impasse ; cf. document COMIFER 1997 « Eléments complémentaires à la méthode de raisonnement de la fertilisation PK permettant d'aider à sa mise en œuvre »

¹² C'est acceptable compte tenu de l'évolution lente des teneurs en P, K ou Mg dans les sols suivant le bilan entrée-sortie

¹³ cf. paragraphe 2

2.5 LA GESTION DES RÉSIDUS DE CULTURES

Dans le cas du potassium voire du magnésium, présents en plus grande quantité dans les parties végétatives (tiges, feuilles,... Tableau 1) que dans les parties reproductives (graines) des plantes, l'exportation de ces résidus peut représenter un flux de K ou Mg bien plus considérable que celui de l'exportation par les récoltes, de grain en particulier. Il est donc nécessaire d'en tenir compte. La Grille COMIFER 2009 recommande donc d'apporter à la culture suivante une dose de K correspondant à l'exportation par les pailles, si l'offre du sol initiale est inférieure à Timp, c'est-à-dire que l'on cherche au moins à stabiliser la teneur du sol. En situation de sol avec une teneur plus élevée, on ne compense pas, comptant sur la consommation du stock du sol.

Les résidus de culture exportent une relativement faible quantité de P par rapport aux parties récoltées, du fait de leur teneur en P plus faibles¹⁴. Néanmoins, on préconise, comme pour K, une compensation des exportations dans le cas d'une teneur du sol inférieure à Timp, auquel cas on apporte un supplément de phosphore égal à l'exportation par les pailles.

2.6 LE PLAFONNEMENT DES DOSES

Plus généralement, l'apport total en grandes cultures est plafonné car des apports très élevés qui pourraient être calculés dans des situations de faible teneur du sol et fort objectif de rendement ne se montrent pas aussi efficaces qu'attendus. Il est préférable dans ce cas, de réaliser des apports réguliers. Il est plafonné également, à un niveau plus bas, pour les cultures fourragères. La forte teneur en K des cultures fourragères, associée au fort tonnage récolté, peut conduire à des calculs de dose très élevés qu'on peut proposer de limiter car de très fortes doses calculées par la procédure habituelle se sont avérées expérimentalement non nécessaires pour atteindre le rendement objectif.

2.7 VALORISATION DES RELIQUATS D'APPORTS ANTÉRIEURS

Dans le cas d'apports d'effluents d'élevage, l'exploitant peut être amené à apporter plus de K ou de P que nécessaire pour la culture réceptrice une année donnée, conduisant à la constitution d'un reliquat d'éléments fertilisants non utilisés. Il en est de même dans le cas de la pratique du blocage de la fertilisation en tête de rotation.

Il est admis qu'il peut exister une perte de biodisponibilité au cours du temps, aussi dans le cas d'un excès de fertilisation sous forme organique ou minérale, on pourra ne retenir qu'une part du reliquat potentiel qui sera déduite des besoins de ou des cultures suivantes. Par défaut, la valeur de 80% est admise (COMIFER 1997). Ceci sera à évaluer par type de sol car tous ne conduisent pas à une perte de disponibilité visible.

¹⁴C'est particulièrement vrai dans le cas des cultures dont on récolte les graines

ADAPTATION DU RAISONNEMENT À LA MULTIPLICITÉ DES PRATIQUES

Le raisonnement présenté jusqu'à présent s'applique dans l'hypothèse de l'utilisation d'engrais immédiatement disponibles pour la plante (K et Mg solubles dans l'eau, et P soluble dans l'eau et/ou dans le citrate d'ammonium neutre). Ce raisonnement traite aussi des résidus de cultures et des effluents d'élevage bruts. Il a été paramétré dans des situations expérimentales labourées, avec apport des engrais sur toute la surface.

Dans le cas d'utilisation d'autres fertilisants ou dans le cas de systèmes de culture différents, des adaptations du raisonnement sont nécessaires.

3.1 LES NOUVELLES MATIÈRES FERTILISANTES

La gamme des fertilisants disponibles sur le marché s'est enrichie, du fait de l'utilisation d'une multiplicité de sources, elles-mêmes soumises à différents processus de traitements. On peut citer, à titre d'exemples, la struvite, les cendres, les digestats, les composts, les boues, etc. Parallèlement à ces matières majoritairement issues du recyclage (MAFOR*), on assiste aussi à l'utilisation de certains minerais bruts, essentiellement phosphatés (phosphates naturels).

Lorsqu'ils sont apportés au champ, les éléments chimiques contenus dans les matières fertilisantes sont intégrés plus ou moins rapidement aux compartiments minéraux du sol. Ils sont d'abord solubilisés –plus ou moins vite- transitoirement dans la solution du sol puis ils peuvent se lier de façon plus ou moins forte à la fraction solide du sol (adsorption, précipitation, ...). La cinétique de ces phénomènes est très variable. Elle est dépendante des éléments concernés, de la nature du produit et de sa finesse, des caractéristiques du milieu, des facteurs climatiques et des techniques culturales (incorporation, mélange au sol, ...). Il faudra donc en tenir compte dans le cadre du raisonnement des apports. Quand la fertilisation a pour but de compléter à court terme une offre du sol insuffisante pour satisfaire les besoins des peuplements végétaux,

il sera nécessaire d'utiliser des produits dont le K_{eq} est le plus élevé (cf § 1.3).

On a pu croire que les procédés visant à stabiliser l'évolution de certains produits organiques comme le chaulage des boues, pouvait avoir des conséquences préjudiciables sur la disponibilité du phosphore. Les études en laboratoire et avec végétation ont montré qu'il ne fallait pas tirer de conclusion hâtive : certains produits de type boues de station d'épuration chaulées, ont une efficacité importante dès la première année (85 % de disponibilité). En outre, le passage sous forme organique (compostage) n'aboutit pas à une meilleure biodisponibilité.

3.2 LOCALISATION DES APPORTS

Des apports réalisés sur la ligne de semis (engrais starter) ont montré leur efficacité dans des sols à teneur faible pour des cultures de printemps (maïs essentiellement), en particulier sur la vigueur des jeunes plantes dans les situations où il y a un risque de conditions défavorables en début de cycle. Cette technique est également étudiée pour favoriser l'installation des cultures d'automne par exemple sur colza. L'augmentation localisée de la teneur de minéraux en solution, en particulier dans les sols à

* matières fertilisantes d'origine résiduaire

fort pouvoir tampon, va aider la plante à acquérir les nutriments dont elle a besoin malgré un enracinement encore peu développé. Une mise en place rapide de l'indice foliaire va permettre une croissance juvénile soutenue.

L'apport limité localisé sécurise alors le démarrage de la culture. Par contre, les gains de rendements ne sont pas toujours observés au final. En situation où la fertilisation est nécessaire, l'apport en localisé améliore l'efficacité de l'engrais en début de cycle de culture, mais ne réduit pas le besoin de fertilisation sur le moyen terme. L'apport localisé en ligne au semis apporte aussi une réponse dans la situation de semis direct où l'apport d'engrais en surface n'est pas suivi d'une incorporation ou d'un mélange possible au sol. Des évaluations de ces pratiques sont en cours afin de ne pas extrapoler excessivement un cas isolé à l'ensemble des cultures.

3.3 TECHNIQUES CULTURALES SIMPLIFIÉES

Le développement des techniques culturales simplifiées nous interroge sur l'extrapolation du diagnostic établi sur la base d'un référentiel d'essais régulièrement labourés. En effet, après 5 à 10 années sans labour, on constate une différenciation des teneurs en fonction de la profondeur sur l'ancien horizon labouré. Le gradient de teneur en P, K, Mg est tel que les premiers centimètres se trouvent enrichis grâce aux apports de matières fertilisantes et au retour au sol des résidus de culture non enfouis. Dès lors, des teneurs mesurées sur des profondeurs différentes conduiraient à des raisonnements erronés :

- dans le seul horizon superficiel enrichi, on peut croire à une augmentation de fertilité du sol, alors qu'il y a vraisemblablement un phénomène d'appauvrissement dans l'horizon sous-jacent. Ce compartiment également prospecté par les racines contribue d'autant plus à la nutrition de la plante qu'il sera plus longtemps humide que les horizons superficiels lors des périodes sèches ;
- dans le seul horizon sous-jacent, on pourrait considérer une diminution de la fertilité, alors que les prélèvements au stade jeune de la plante qui sont déterminants en général, pourraient se réaliser dans de bonnes conditions – pour autant que l'humidité du sol en surface soit correcte – puisqu'essentiellement réalisés dans un horizon enrichi.

Aujourd'hui, après une étude menée en 2014 par le COMIFER et le GEMAS, les laboratoires membres du GEMAS recommandent – dans l'attente de références précises acquises en non-labour de longue durée – de continuer à prélever sur l'ancienne profondeur de labour pour éviter ces biais. En pratique, si cette dernière n'est pas connue avec précision, un prélèvement sur 0-20 cm est conseillé car il reste interprétable par le référentiel actuel.

Il est évident que dans le contexte de ces nouvelles méthodes de travail du sol réduit, beaucoup d'autres facteurs doivent être examinés avec beaucoup plus d'attention que pour les sols labourés :

- homogénéité de la dispersion des matières fertilisantes et notamment des produits organiques ;
- Impact d'une sécheresse qui peut conduire les racines à descendre rapidement en profondeur sous l'horizon enrichi ;
- Absence de pluviométrie après un apport qui peut nuire à la dissolution des particules d'engrais.

ANNEXE 1 : TENEURS-SEUILS PROPOSÉES PAR ARVALIS

| | | Seuils P ₂ O ₅ en mg/kg - Méthode Joret-Hébert | | | | | |
|---|--|--|----------|------------------|----------|-----------------|----------|
| Exigence de la culture --> Seuil --> | | Forte exigence | | Moyenne exigence | | Faible exigence | |
| | | Trenforcé | Timpasse | Trenforcé | Timpasse | Trenforcé | Timpasse |
| Nord-Picardie | Limons battants | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Nord-Picardie | Limons argileux | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Nord-Picardie | Argiles | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Nord-Picardie | Cranettes | 280 | 400 | 250 | 300 | 200 | 260 |
| Champagne Ardenne | Craie | 280 | 400 | 250 | 300 | 200 | 260 |
| Champagne Ardenne | Limon | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Champagne Ardenne | Limon argileux | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Champagne Ardenne | Argilo-calcaire superf | 140 | 200 | 80 | 180 | 70 | 150 |
| Champagne Ardenne | Argilo-calcaire prof | 120 | 180 | 80 | 120 | 50 | 120 |
| Champagne Ardenne | Sable | 60 | 160 | 60 | 160 | 40 | 130 |
| Lorraine | Argilo-calcaires profonds (Barrois, Haye), argiles calcaires du plateau lorrain | 120 | 180 | 80 | 120 | 50 | 120 |
| Lorraine | Argilo-calcaire superficiels (prof<=40cm) | 140 | 200 | 80 | 180 | 70 | 150 |
| Lorraine | Limons | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Lorraine | Limons argileux | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Lorraine | Argiles lourdes | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Alsace | Limons loess | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Alsace | Alluvions de l'Ill | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Alsace | Limons lehm | 120 | 160 | 120 | 180 | 70 | 170 |
| Alsace | Hardt superficielle, Ried brun caillouteux | 140 | 200 | 80 | 180 | 70 | 150 |
| Alsace | Hardt profonde, Ried brun profond, basse plaine rhénane | 120 | 180 | 80 | 120 | 50 | 120 |
| Alsace | Argilo-calcaires profonds Alsace bossue, basse plaine sous-vosgienne | 120 | 180 | 80 | 120 | 50 | 120 |
| Alsace | Argilo-calcaires caillouteux Alsace bossue, basse plaine sous-vosgienne | 140 | 200 | 80 | 180 | 70 | 150 |
| Franche Comté | Limons (A%<20%) | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Franche Comté | Limons argileux | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Franche Comté | Limons arg. superf. de plateaux | 110 | 160 | 110 | 170 | 70 | 160 |
| Franche Comté | sols argileux de vallées | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Franche Comté | sols argileux, calcaires, de vallées | 120 | 180 | 80 | 120 | 50 | 120 |
| Franche Comté | Limons hydromorphes | 120 | 160 | 120 | 180 | 70 | 170 |
| Franche Comté | argiles hydromorphes de vallées | 120 | 160 | 120 | 180 | 70 | 170 |
| Bourgogne | Argilo-calcaires superficiels | 140 | 200 | 80 | 180 | 70 | 150 |
| Bourgogne | Argilo-calcaires profonds | 120 | 180 | 80 | 120 | 50 | 120 |
| Bourgogne | limons et argiles profonds | 80 | 160 | 80 | 130 | 70 | 120 |
| Bourgogne | limons battants | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Bourgogne | sols sablo-graveleux | 60 | 160 | 60 | 160 | 40 | 130 |
| Bourgogne | alluvions argileuses | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Centre Limousin | Argilo-calcaires superficiels caillouteux | 140 | 200 | 80 | 180 | 70 | 150 |
| Centre Limousin | Argilo-calcaires profonds peu caillouteux | 120 | 180 | 80 | 120 | 50 | 120 |
| Centre Limousin | limon argileux | 80 | 160 | 80 | 130 | 70 | 120 |
| Centre Limousin | limon battant | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Centre Limousin | sables | 60 | 160 | 60 | 160 | 40 | 130 |
| Centre Limousin | limon sableux | 60 | 160 | 60 | 160 | 70 | 130 |
| Centre Limousin | limons sur argile à silex | 90 | 210 | 90 | 140 | 50 | 130 |
| Centre Limousin | Argile lourde | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Centre Bassin parisien | limons battants | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Centre Bassin parisien | limons de Beauce | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Centre Bassin parisien | sables | 60 | 160 | 60 | 160 | 40 | 130 |
| Centre Bassin parisien | limons sableux | 60 | 160 | 60 | 160 | 40 | 130 |
| Centre Bassin parisien | Argilo-calcaires superficiels caillouteux | 140 | 200 | 80 | 180 | 70 | 150 |
| Centre Bassin parisien | Argilo-calcaires profonds peu caillouteux | 120 | 180 | 80 | 120 | 50 | 120 |
| Centre Bassin parisien | Argilo-calcaires de Beauce | 120 | 180 | 80 | 120 | 50 | 120 |
| Haute Normandie | limons des plateaux | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Haute Normandie | limons caillouteux sur argile à silex | 120 | 180 | 120 | 180 | 90 | 170 |
| Haute Normandie | argilo-calcaires superficiels sur craie | 140 | 200 | 80 | 180 | 70 | 150 |
| Haute Normandie | sables caillouteux non calcaires | 80 | 200 | 80 | 180 | 40 | 150 |
| Basse Normandie | Limons | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Basse Normandie | Argilo-calcaires | 140 | 200 | 80 | 180 | 70 | 150 |
| Basse Normandie | Sables | 60 | 160 | 60 | 160 | 40 | 130 |
| Basse Normandie | Terres lourdes | 140 | 160 | 80 | 180 | 70 | 150 |
| Bretagne Pays de Loire | Limons sains et limons sableux | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Bretagne Pays de Loire | Limons caillouteux superficiels. | 120 | 180 | 120 | 180 | 90 | 170 |
| Bretagne Pays de Loire | sables | 60 | 160 | 60 | 160 | 40 | 130 |
| Bretagne Pays de Loire | argilo-calcaires profonds sur mame | 120 | 180 | 80 | 120 | 50 | 120 |
| Bretagne Pays de Loire | Argilo-calcaires superficiels | 140 | 200 | 80 | 180 | 70 | 150 |
| Poitou Charentes | Terres de Groie | 140 | 200 | 80 | 150 | 60 | 130 |
| Poitou Charentes | Argilo-calcaires profonds sur calcaires mameux | 120 | 180 | 80 | 120 | 50 | 120 |
| Poitou Charentes | Aubues légères et champagnes superficielles | 280 | 300 | 200 | 250 | 100 | 220 |
| Poitou Charentes | Aubues lourdes et champagnes profondes | 280 | 400 | 250 | 300 | 200 | 260 |
| Poitou Charentes | Limons, terres rouges, bornais, douxins limoneux | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Poitou Charentes | Sols sableux | 60 | 160 | 60 | 160 | 40 | 130 |
| Haute Marnes | Limons | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Haute Marnes | Sols superficiels du Barrois (G1, G2) et autres sols argileux (G3, G4) à 30% arg | 120 | 180 | 80 | 150 | 50 | 130 |
| Haute Marnes | Sols superficiels du Barrois (G1, G2) et autres sols argileux (G3, G4) à 40% arg | 120 | 200 | 80 | 150 | 50 | 130 |
| Auvergne | Terre noire | 120 | 180 | 80 | 150 | 50 | 130 |
| Auvergne | Argilo-calcaire | 120 | 180 | 80 | 120 | 50 | 120 |
| Auvergne | Granitique | 120 | 180 | 120 | 180 | 70 | 170 |
| Auvergne | Sologne | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Auvergne | Alluvions récentes (sableuses) | 60 | 160 | 60 | 160 | 40 | 130 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Varenne | 90 | 190 | 90 | 190 | 70 | 160 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Gravier, diluvium | 110 | 170 | 110 | 170 | 80 | 160 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Limon blanc sain | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Limon blanc humide | 120 | 180 | 120 | 180 | 90 | 170 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Limon argileux sain | 100 | 160 | 100 | 160 | 70 | 150 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Limon argileux humide | 120 | 180 | 120 | 180 | 90 | 170 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Argilo-calcaire prof. | 120 | 180 | 80 | 120 | 50 | 120 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Argilo-calcaire superficiel | 140 | 200 | 80 | 180 | 70 | 150 |
| Sud Ouest | Sols acides limoneux ou argileux (boulbènes, alluvions, Ségala) | 60 | 120 | 60 | 100 | 40 | 120 |
| Sud Ouest | Sols basiques ou argilo-calcaires (terreforts, alluvions) | 60 | 120 | 60 | 100 | 40 | 100 |

| | | Seuils P ₂ O ₅ en mg/kg - Méthode Olsen | | | | | |
|----------------------------|--|---|----------|------------------|----------|-----------------|----------|
| Exigence de la culture --> | | Forte exigence | | Moyenne exigence | | Faible exigence | |
| Seuil --> | | Trenforcé | Timpasse | Trenforcé | Timpasse | Trenforcé | Timpasse |
| Nord-Picardie | Limons battants | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Nord-Picardie | Limons argileux | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Nord-Picardie | Argiles | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Nord-Picardie | Cranettes | 145 | 210 | 130 | 150 | 60 | 135 |
| Champagne Ardenne | Craie | 145 | 210 | 130 | 150 | 60 | 135 |
| Champagne Ardenne | Limon | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Champagne Ardenne | Limon argileux | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Champagne Ardenne | Argilo-calcaire superf | 60 | 90 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Champagne Ardenne | Argilo-calcaire prof | 60 | 90 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Champagne Ardenne | Sable | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Lorraine | Argilo-calcaires profonds (Barrois, Haye), argiles calcaires du plateau lorrain | 60 | 90 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Lorraine | Argilo-calcaire superficiels (prof<=40cm) | 60 | 90 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Lorraine | Limons | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Lorraine | Limons argileux | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Lorraine | Argiles lourdes | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Alsace | Limons loess | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Alsace | Alluvions de l'III | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Alsace | Limons lehm | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Alsace | Hardt superficielle, Ried brun caillouteux | 60 | 90 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Alsace | Hardt profonde, Ried brun profond, basse plaine rhénane | 60 | 90 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Alsace | Argilo-calcaires profonds Alsace bossue, basse plaine sous-vosgienne | 60 | 90 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Alsace | Argilo-calcaires caillouteux Alsace bossue, basse plaine sous-vosgienne | 60 | 90 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Franche Comté | Limons (A%<20%) | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Franche Comté | Limons argileux | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Franche Comté | Limons arg. superf. de plateaux | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Franche Comté | sols argileux de vallées | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Franche Comté | sols argileux, calcaires, de vallées | 60 | 90 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Franche Comté | Limons hydromorphes | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Franche Comté | argiles hydromorphes de vallées | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Bourgogne | Argilo-calcaires superficiels | 60 | 90 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Bourgogne | Argilo-calcaires profonds | 60 | 90 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Bourgogne | limons et argiles profonds | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Bourgogne | limons battants | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Bourgogne | sols sablo-graveleux | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Bourgogne | alluvions argileuses | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Centre Limousin | Argilo-calcaires superficiels caillouteux | 60 | 90 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Centre Limousin | Argilo-calcaires profonds peu caillouteux | 60 | 90 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Centre Limousin | limon argileux | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Centre Limousin | limon battant | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Centre Limousin | sables | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Centre Limousin | limon sableux | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Centre Limousin | limons sur argile à silex | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Centre Limousin | Argile lourde | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Centre Bassin parisien | limons battants | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Centre Bassin parisien | limons de Beauce | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Centre Bassin parisien | sables | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Centre Bassin parisien | limons sableux | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Centre Bassin parisien | Argilo-calcaires superficiels caillouteux | 60 | 90 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Centre Bassin parisien | Argilo-calcaires profonds peu caillouteux | 60 | 90 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Centre Bassin parisien | Argilo-calcaires de Beauce | 60 | 90 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Haute Normandie | limons des plateaux | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Haute Normandie | limons caillouteux sur argile à silex | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Haute Normandie | argilo-calcaires superficiels sur craie | 60 | 100 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Haute Normandie | sables caillouteux non calcaires | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Basse Normandie | Limons | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Basse Normandie | Argilo-calcaires | 60 | 90 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Basse Normandie | Sables | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Basse Normandie | Terres lourdes | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Bretagne Pays de Loire | Limons sains et limons sableux | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Bretagne Pays de Loire | Limons caillouteux superficiels. | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Bretagne Pays de Loire | sables | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Bretagne Pays de Loire | argilo-calcaires profonds sur marne | 60 | 90 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Bretagne Pays de Loire | Argilo-calcaires superficiels | 60 | 90 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Poitou Charentes | Terres de Groie | 60 | 90 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Poitou Charentes | Argilo-calcaires profonds sur calcaires marneux | 60 | 90 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Poitou Charentes | Aubues légères et champagnes superficielles | 145 | 210 | 130 | 150 | 60 | 135 |
| Poitou Charentes | Aubues lourdes et champagnes profondes | 145 | 210 | 130 | 150 | 60 | 135 |
| Poitou Charentes | Limons, terres rouges, bornais, doucins limoneux | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Poitou Charentes | Sols sableux | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Haute Marne | Limons | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Haute Marne | Sols superficiels du Barrois (G1, G2) et autres sols argileux (G3, G4) à 30% arg | 60 | 90 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Haute Marne | Sols superficiels du Barrois (G1, G2) et autres sols argileux (G3, G4) à 40% arg | 60 | 90 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Auvergne | Terre noire | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Auvergne | Argilo-calcaire | 60 | 90 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Auvergne | Granitique | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Auvergne | Sologne | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Auvergne | Alluvions récentes (sableuses) | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Varenne | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Gravier, diluvium | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Limon blanc sain | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Limon blanc humide | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Limon argileux sain | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Limon argileux humide | 50 | 80 | 50 | 80 | 20 | 70 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Argilo-calcaire prof. | 60 | 90 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Argilo-calcaire superficiel | 60 | 90 | 60 | 90 | 30 | 80 |
| Sud Ouest | Sols acides limoneux ou argileux (boulbènes, alluvions, Ségala) | 40 | 80 | 30 | 80 | 20 | 45 |
| Sud Ouest | Sols basiques ou argilo-calcaires (terreforts, alluvions) | 40 | 80 | 30 | 80 | 20 | 45 |

| | | Seuils P ₂ O ₅ en mg/kg - Méthode Dyer | | | | | |
|----------------------------|---|--|----------|------------------|----------|-----------------|----------|
| Exigence de la culture --> | Seuil --> | Forte exigence | | Moyenne exigence | | Faible exigence | |
| | | Trenforcé | Timpasse | Trenforcé | Timpasse | Trenforcé | Timpasse |
| Nord-Picardie | Limons battants | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Nord-Picardie | Limons argileux | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Nord-Picardie | Argiles | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Nord-Picardie | Cranettes | | | | | | |
| Champagne Ardenne | Craie | | | | | | |
| Champagne Ardenne | Limon | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Champagne Ardenne | Limon argileux | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Champagne Ardenne | Argilo-calcaire superf | | | | | | |
| Champagne Ardenne | Argilo-calcaire prof | | | | | | |
| Champagne Ardenne | Sable | 100 | 280 | 100 | 280 | 70 | 200 |
| Lorraine | Argilo-calcaires profonds (Barrois, Haye), argiles calcaires du plateau lorrain | | | | | | |
| Lorraine | Argilo-calcaire superficiels (prof<=40cm) | | | | | | |
| Lorraine | Limons | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Lorraine | Limons argileux | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Lorraine | Argiles lourdes | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Alsace | Limons loess | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Alsace | Alluvions de l'III | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Alsace | Limons lehm | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Alsace | Hardt superficielle, Ried brun caillouteux | | | | | | |
| Alsace | Hardt profonde, Ried brun profond, basse plaine rhénane | | | | | | |
| Alsace | Argilo-calcaires profonds Alsace bossue, basse plaine sous-vosgienne | | | | | | |
| Alsace | Argilo-calcaires caillouteux Alsace bossue, basse plaine sous-vosgienne | | | | | | |
| Franche Comté | Limons (A%<20%) | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Franche Comté | Limons argileux | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Franche Comté | Limons arg. superf. de plateaux | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Franche Comté | sols argileux de vallées | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Franche Comté | sols argileux, calcaires, de vallées | | | | | | |
| Franche Comté | Limons hydromorphes | 200 | 260 | 180 | 260 | 150 | 250 |
| Franche Comté | argiles hydromorphes de vallées | 200 | 260 | 180 | 260 | 150 | 250 |
| Bourgogne | Argilo-calcaires superficiels | | | | | | |
| Bourgogne | Argilo-calcaires profonds | | | | | | |
| Bourgogne | limons et argiles profonds | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Bourgogne | limons battants | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Bourgogne | sols sablo-graveleux | 100 | 280 | 100 | 280 | 70 | 200 |
| Bourgogne | alluvions argileuses | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Centre Limousin | Argilo-calcaires superficiels caillouteux | | | | | | |
| Centre Limousin | Argilo-calcaires profonds peu caillouteux | | | | | | |
| Centre Limousin | limon argileux | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Centre Limousin | limon battant | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Centre Limousin | sables | 100 | 280 | 100 | 280 | 70 | 200 |
| Centre Limousin | limon sableux | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Centre Limousin | limons sur argile à silex | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Centre Limousin | Argile lourde | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Centre Bassin parisien | limons battants | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Centre Bassin parisien | limons de Beauce | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Centre Bassin parisien | sables | 100 | 280 | 100 | 280 | 70 | 200 |
| Centre Bassin parisien | limons sableux | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Centre Bassin parisien | Argilo-calcaires superficiels caillouteux | | | | | | |
| Centre Bassin parisien | Argilo-calcaires profonds peu caillouteux | | | | | | |
| Centre Bassin parisien | Argilo-calcaires de Beauce | | | | | | |
| Haute Normandie | limons des plateaux | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Haute Normandie | limons caillouteux sur argile à silex | 190 | 250 | 170 | 250 | 140 | 240 |
| Haute Normandie | argilo-calcaires superficiels sur craie | | | | | | |
| Haute Normandie | sables caillouteux non calcaires | 130 | 300 | 130 | 310 | 60 | 230 |
| Basse Normandie | Limons | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Basse Normandie | Argilo-calcaires | | | | | | |
| Basse Normandie | Sables | 100 | 280 | 100 | 280 | 70 | 200 |
| Basse Normandie | Terres lourdes | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Bretagne Pays de Loire | Limons sains et limons sableux | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Bretagne Pays de Loire | Limons caillouteux superficiels. | 190 | 250 | 170 | 250 | 140 | 240 |
| Bretagne Pays de Loire | sables | 100 | 280 | 100 | 280 | 70 | 200 |
| Bretagne Pays de Loire | argilo-calcaires profonds sur marne | | | | | | |
| Bretagne Pays de Loire | Argilo-calcaires superficiels | | | | | | |
| Poitou Charentes | Terres de Groie | | | | | | |
| Poitou Charentes | Argilo-calcaires profonds sur calcaires marneux | | | | | | |
| Poitou Charentes | Aubues légères et champagnes superficielles | | | | | | |
| Poitou Charentes | Aubues lourdes et champagnes profondes | | | | | | |
| Poitou Charentes | Limons, terres rouges, bornais, doucins limoneux | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 200 |
| Poitou Charentes | Sols sableux | 100 | 280 | 100 | 280 | 70 | 200 |
| Haute Marne | Limons | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Haute Marne | Sols superficiels du Barrois (G1, G2) et autres sols argileux (G3, G4) à 30% argile | | | | | | |
| Haute Marne | Sols superficiels du Barrois (G1, G2) et autres sols argileux (G3, G4) à 40% argile | | | | | | |
| Auvergne | Terre noire | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Auvergne | Argilo-calcaire | | | | | | |
| Auvergne | Granitique | 180 | 250 | 180 | 250 | 110 | 230 |
| Auvergne | Sologne | 160 | 220 | 160 | 220 | 110 | 200 |
| Auvergne | Alluvions récentes (sableuses) | 100 | 280 | 100 | 220 | 70 | 160 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Varenne | 130 | 270 | 130 | 230 | 100 | 230 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Gravier, diluvium | 150 | 250 | 150 | 250 | 110 | 230 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Limon blanc sain | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Limon blanc humide | 200 | 260 | 180 | 260 | 150 | 250 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Limon argileux sain | 160 | 220 | 140 | 220 | 110 | 210 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Limon argileux humide | 200 | 260 | 180 | 260 | 150 | 250 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Argilo-calcaire prof. | | | | | | |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Argilo-calcaire superficiel | | | | | | |
| Sud Ouest | Sols acides limoneux ou argileux (boulbènes, alluvions, Ségala) | 80 | 160 | 80 | 120 | 40 | 120 |
| Sud Ouest | Sols basiques ou argilo-calcaires (terreforts, alluvions) | 80 | 160 | 80 | 120 | 40 | 120 |

| | | Seuils K ₂ O échangeable, en mg/kg | | | | | |
|----------------------------|--|---|----------|------------------|----------|-----------------|----------|
| Exigence de la culture → | | Forte exigence | | Moyenne exigence | | Faible exigence | |
| Seuil → | | Trenforcé | Timpasse | Trenforcé | Timpasse | Trenforcé | Timpasse |
| Nord-Picardie | Limons battants | 170 | 300 | 120 | 180 | 80 | 150 |
| Nord-Picardie | Limons argileux | 200 | 400 | 150 | 220 | 100 | 150 |
| Nord-Picardie | Argiles | 250 | 450 | 200 | 270 | 150 | 200 |
| Nord-Picardie | Cranettes | 200 | 400 | 80 | 250 | 50 | 100 |
| Champagne Ardenne | Craie | 200 | 400 | 80 | 250 | 50 | 100 |
| Champagne Ardenne | Limon | 170 | 300 | 120 | 180 | 80 | 150 |
| Champagne Ardenne | Limon argileux | 200 | 400 | 150 | 220 | 100 | 150 |
| Champagne Ardenne | Argilo-calcaire superf | 300 | 450 | 300 | 400 | 150 | 300 |
| Champagne Ardenne | Argilo-calcaire prof | 250 | 300 | 200 | 300 | 100 | 180 |
| Champagne Ardenne | Sable | 100 | 100 | 70 | 100 | 60 | 100 |
| Lorraine | Argilo-calcaires profonds (Barrois, Haye), argiles calcaires du plateau lorrain | 250 | 300 | 200 | 300 | 100 | 180 |
| Lorraine | Argilo-calcaire superficiels (prof<=40cm) | 300 | 450 | 300 | 400 | 150 | 300 |
| Lorraine | Limons | 170 | 300 | 120 | 180 | 80 | 150 |
| Lorraine | Limons argileux | 200 | 400 | 150 | 220 | 100 | 150 |
| Lorraine | Argiles lourdes | 300 | 450 | 300 | 400 | 150 | 300 |
| Alsace | Limons loess | 200 | 400 | 150 | 220 | 100 | 150 |
| Alsace | Alluvions de l'ill | 200 | 400 | 150 | 220 | 100 | 150 |
| Alsace | Limons lehm | 180 | 300 | 130 | 190 | 80 | 160 |
| Alsace | Hardt superficielle, Ried brun caillouteux | 300 | 400 | 300 | 400 | 150 | 300 |
| Alsace | Hardt profonde, Ried brun profond, basse plaine rhénane | 250 | 300 | 200 | 300 | 100 | 180 |
| Alsace | Argilo-calcaires profonds Alsace bossue, basse plaine sous-vosgienne | 250 | 300 | 200 | 300 | 100 | 180 |
| Alsace | Argilo-calcaires caillouteux Alsace bossue, basse plaine sous-vosgienne | 300 | 400 | 300 | 400 | 150 | 300 |
| Franche Comté | Limons (A%<20%) | 170 | 300 | 120 | 180 | 80 | 150 |
| Franche Comté | Limons argileux | 200 | 400 | 150 | 220 | 100 | 150 |
| Franche Comté | Limons arg. superf. de plateaux | 220 | 400 | 170 | 240 | 100 | 170 |
| Franche Comté | sols argileux de vallées | 250 | 450 | 200 | 270 | 150 | 200 |
| Franche Comté | sols argileux, calcaires, de vallées | 250 | 300 | 200 | 300 | 100 | 180 |
| Franche Comté | Limons hydromorphes | 180 | 300 | 130 | 190 | 80 | 160 |
| Franche Comté | argiles hydromorphes de vallées | 260 | 450 | 210 | 280 | 150 | 210 |
| Bourgogne | Argilo-calcaires superficiels | 300 | 450 | 300 | 400 | 150 | 300 |
| Bourgogne | Argilo-calcaires profonds | 250 | 300 | 200 | 300 | 100 | 180 |
| Bourgogne | limons et argiles profonds | 200 | 300 | 150 | 220 | 80 | 150 |
| Bourgogne | limons battants | 170 | 300 | 120 | 180 | 80 | 150 |
| Bourgogne | sols sablo-graveleux | 150 | 200 | 70 | 120 | 60 | 100 |
| Bourgogne | alluvions argileuses | 250 | 450 | 200 | 290 | 150 | 200 |
| Centre Limousin | Argilo-calcaires superficiels caillouteux | 300 | 400 | 300 | 400 | 150 | 300 |
| Centre Limousin | Argilo-calcaires profonds peu caillouteux | 200 | 300 | 200 | 300 | 100 | 180 |
| Centre Limousin | limon argileux | 200 | 400 | 150 | 220 | 100 | 150 |
| Centre Limousin | limon battant | 170 | 300 | 120 | 180 | 80 | 150 |
| Centre Limousin | sables | 150 | 200 | 70 | 120 | 40 | 100 |
| Centre Limousin | limon sableux | 170 | 300 | 120 | 180 | 80 | 150 |
| Centre Limousin | limons sur argile à silex | 180 | 310 | 130 | 190 | 90 | 160 |
| Centre Limousin | Argile lourde | 250 | 450 | 200 | 270 | 150 | 200 |
| Centre Bassin parisien | limons battants | 170 | 300 | 120 | 180 | 80 | 150 |
| Centre Bassin parisien | limons de Beauce | 200 | 400 | 150 | 220 | 100 | 150 |
| Centre Bassin parisien | sables | 150 | 200 | 70 | 120 | 40 | 100 |
| Centre Bassin parisien | limons sableux | 170 | 250 | 120 | 180 | 80 | 150 |
| Centre Bassin parisien | Argilo-calcaires superficiels caillouteux | 300 | 400 | 300 | 400 | 150 | 300 |
| Centre Bassin parisien | Argilo-calcaires profonds peu caillouteux | 200 | 300 | 200 | 300 | 100 | 180 |
| Centre Bassin parisien | Argilo-calcaires de Beauce | 170 | 300 | 170 | 250 | 100 | 200 |
| Haute Normandie | limons des plateaux | 170 | 300 | 120 | 180 | 80 | 150 |
| Haute Normandie | limons caillouteux sur argile à silex | 180 | 310 | 130 | 190 | 90 | 160 |
| Haute Normandie | argilo-calcaires superficiels sur craie | 350 | 450 | 300 | 400 | 150 | 300 |
| Haute Normandie | sables caillouteux non calcaires | 160 | 200 | 80 | 160 | 40 | 110 |
| Basse Normandie | Limons | 170 | 300 | 120 | 180 | 80 | 150 |
| Basse Normandie | Argilo-calcaires | 250 | 300 | 200 | 300 | 100 | 180 |
| Basse Normandie | Sables | 160 | 200 | 90 | 160 | 50 | 110 |
| Basse Normandie | Terres lourdes | 250 | 450 | 200 | 270 | 150 | 200 |
| Bretagne Pays de Loire | Limons sains et limons sableux | 170 | 300 | 120 | 180 | 80 | 150 |
| Bretagne Pays de Loire | Limons caillouteux superficiels. | 190 | 320 | 140 | 200 | 100 | 170 |
| Bretagne Pays de Loire | sables | 100 | 150 | 70 | 100 | 50 | 100 |
| Bretagne Pays de Loire | argilo-calcaires profonds sur marne | 250 | 300 | 200 | 300 | 100 | 180 |
| Bretagne Pays de Loire | Argilo-calcaires superficiels | 400 | 450 | 300 | 400 | 150 | 300 |
| Poitou Charentes | Terres de Groie | 450 | 500 | 250 | 450 | 150 | 300 |
| Poitou Charentes | Argilo-calcaires profonds sur calcaires marneux | 300 | 350 | 200 | 300 | 100 | 180 |
| Poitou Charentes | Aubues légères et champagnes superficielles | 200 | 400 | 80 | 250 | 50 | 100 |
| Poitou Charentes | Aubues lourdes et champagnes profondes | 200 | 400 | 80 | 250 | 50 | 100 |
| Poitou Charentes | Limons, terres rouges, bornais, doucins limoneux | 170 | 300 | 120 | 180 | 80 | 150 |
| Poitou Charentes | Sols sableux | 160 | 200 | 90 | 130 | 50 | 130 |
| Haute Marne | Limons | 170 | 300 | 120 | 180 | 80 | 150 |
| Haute Marne | Sols superficiels du Barrois (G1, G2) et autres sols argileux (G3, G4) à 30% arg | 250 | 300 | 200 | 300 | 100 | 180 |
| Haute Marne | Sols superficiels du Barrois (G1, G2) et autres sols argileux (G3, G4) à 40% arg | 350 | 450 | 300 | 400 | 100 | 300 |
| Auvergne | Terre noire | 250 | 300 | 200 | 300 | 100 | 180 |
| Auvergne | Argilo-calcaire | 250 | 300 | 200 | 300 | 100 | 180 |
| Auvergne | Granitique | 170 | 300 | 120 | 160 | 80 | 150 |
| Auvergne | Sologne | 200 | 300 | 120 | 220 | 80 | 150 |
| Auvergne | Alluvions récentes (sableuses) | 100 | 150 | 70 | 100 | 60 | 100 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Varenne | 130 | 230 | 100 | 170 | 80 | 130 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Gravier, diluvium | 110 | 210 | 80 | 150 | 60 | 110 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Limon blanc sain | 170 | 300 | 120 | 180 | 80 | 150 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Limon blanc humide | 180 | 310 | 130 | 190 | 90 | 160 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Limon argileux sain | 200 | 400 | 150 | 220 | 100 | 150 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Limon argileux humide | 210 | 410 | 160 | 230 | 110 | 160 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Argilo-calcaire prof. | 250 | 300 | 200 | 300 | 100 | 180 |
| Rhone Alpes Saône-et-Loire | Argilo-calcaire superficiel | 350 | 450 | 300 | 450 | 150 | 300 |
| Sud Ouest | Sols acides limoneux ou argileux (boulbènes, alluvions, Ségala) | 150 | 200 | 80 | 120 | 40 | 120 |
| Sud Ouest | Sols basiques ou argilo-calcaires (terreforts, alluvions) | 150 | 200 | 80 | 120 | 40 | 120 |

ANNEXE 2 : GRILLE COMIFER 2009 – TENEURS DES RÉCOLTES ET COEFFICIENTS MULTIPLICATEURS

<https://comifer.asso.fr/images/publications/livres/tablesexportgrillescomifer2009.pdf>

TENEURS EN P, K et Mg des organes végétaux récoltés

pour les cultures de plein champ et les principaux fourrages

Le COMIFER propose un tableau des références actualisé des teneurs en P, K et Mg des organes végétaux récoltés concernant les cultures de plein champ et les principaux fourrages. Ces nouvelles références sont celles utilisées actuellement depuis 2007.

Les teneurs en éléments minéraux, exprimées en unités conventionnelles (P_2O_5 pour le phosphore, K_2O pour le potassium et MgO pour le magnésium) permettent le calcul des **bilans culturaux**⁽¹⁾ F-E "fumure-exportation". Représentant la différence entre le total des apports (F) et les exportations des récoltes (E), ces bilans peuvent être calculés à diverses échelles et permettent un diagnostic des pratiques de fertilisation couplé à un suivi de l'évolution des stocks des éléments nutritifs dans le sol. On notera bien que produit récolté et sous produit facultativement récoltable (par exemple, grain et paille) sont présentés séparément ; il faut donc les additionner le cas échéant.

ATTENTION, on ne peut pas utiliser les teneurs de ce tableau pour le calcul de fertilisation suivant la méthode COMIFER 1993⁽²⁾ (grille 1993 et grille 1997) car les coefficients de calcul de cette méthode ont été calés pour des teneurs en P et en K des végétaux parfois forts différentes. Les doses ainsi calculées pourraient être inappropriées. **Une nouvelle grille de calcul de la fertilisation PK a été élaborée en 2009 pour répondre à ces évolutions des teneurs de référence.**

Dans la majorité des cas, la référence correspond à la valeur moyenne des données d'analyses enregistrées dans une base de données créée à partir d'une enquête menée en 2005 auprès de tous les adhérents du COMIFER et d'une synthèse bibliographique actualisée ensuite. Dans les autres cas, la source de la référence est précisée dans le tableau. **La méthode de travail est explicitée dans un document consultable sur le site du COMIFER www.comifer.asso.fr** comportant en annexe les tableaux de calcul associés et des données sur des cultures peu répandues et non présentées ici⁽³⁾.

La tendance sensible à la baisse observée pour les teneurs en phosphore et dans une moindre mesure pour celles en potassium, pourrait s'expliquer par l'évolution des pratiques de fertilisation et l'augmentation de l'efficacité du phosphore et du potassium absorbés, probablement due au progrès génétique et à l'amélioration de la conduite des cultures. En l'absence de références anciennes similaires pour le magnésium, aucune tendance ne peut être identifiée pour cet élément.

La variabilité associée à ces teneurs moyennes est importante. Elle est quantifiée chaque fois que possible par quelques indicateurs dans le document méthodologique⁽³⁾. Les teneurs réelles peuvent couramment varier de l'ordre de 20% autour des moyennes indiquées ici. L'hétérogénéité des sources de données ne permet pas de fournir un indicateur statistique unique de la variabilité autour de chaque moyenne. Les causes de la variabilité sont nombreuses : climat, type de sol, variété, pratiques de fertilisation, état sanitaire, etc...

Les références COMIFER, fruit de l'état actuel des compilations de données, peuvent être utilisées sur le territoire français métropolitain. L'usage de références locales établies pour une culture ou une région donnée à partir d'enquêtes ou d'études plus approfondies ne peut qu'être encouragé.

Les tableaux de référence présentés dans les pages qui suivent pourront être mis à jour à la faveur de nouvelles actualisations de la base de données. Ils pourront être complétés pour d'autres éléments minéraux comme le calcium. On se reportera au site www.comifer.asso.fr pour disposer de la dernière version actualisée de ce tableau.

Le groupe PKMg du COMIFER 2007

(1) COMIFER 1993 Glossaire de la fertilisation N-P-K

(2) COMIFER 1993 Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures

(3) COMIFER 2007 TENEURS EN P, K et Mg DES ORGANES VÉGÉTAUX RÉCOLTABLES MÉTHODE D'ÉTABLISSEMENT et VALEURS DE RÉFÉRENCE

PARTICIPANTS AU GROUPE DE TRAVAIL COMIFER ● P. Castillon (Arvalis Baziège) ● P. Denoroy (INRA Bordeaux) ● R. Duval (ITB Paris) ● P. Eveillard (UNIFA Paris) ● C. Le Souder (Arvalis Boigneville) ● C. Villette (LDAR Laon)

Grandes Cultures, teneur par unité de récolte

NB: pour certaines cultures peu représentées en France, les quelques références disponibles sont reportées seulement dans le document COMIFER, 2007, Teneurs en P, K et Mg des organes végétaux récoltables. Méthode d'établissement et valeurs de référence

| Espèce | Organe | % Mat. Sèche récolte ⁽¹⁾ | Unité de teneur ⁽²⁾ | P ₂ O ₅ | K ₂ O | MgO |
|-----------------------|-----------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------|---------------------|
| Avoine | grain | 85 | kg / q | 0.75 | 0.45 | 0.12 |
| | paille ⁽³⁾ | 86 | kg / t | 3.00 | 12.0 | 1.00 ⁽⁴⁾ |
| Betterave sucrière | racine | 16% sucre | kg / t | 0.50 | 1.80 | 0.35 |
| Blé dur | grain | 85 | kg / q | 0.85 | 0.45 | 0.19 |
| Blé tendre | grain | 85 | kg / q | 0.65 | 0.50 | 0.12 |
| Blé | paille | 88 | kg / t | 1.70 | 12.3 | 0.85 |
| Chicorée | racine | 20 | kg / t | 0.80 | 4.50 | 0.30 |
| Colza | grain | 91 | kg / q | 1.25 | 0.85 | 0.35 |
| | paille | 88 | kg / t | 1.70 | 14.5 | 0.75 |
| Féverole | grain | 86 | kg / q | 1.20 | 1.30 | 0.23 |
| Lentille | grain | 86 | kg / q | 0.90 | - | - |
| Lin | grain | 91 | kg / q | 1.35 | 0.80 | 0.55 |
| | tige rouie | 100 | kg / t | 2.05 | 7.20 | 1.30 |
| Lupin | grain | 86 | kg / q | 0.75 | 1.05 | 0.25 |
| Maïs | épi entier | 81 | kg / q | 0.65 | 0.45 | 0.14 |
| | grain | 85 | kg / q | 0.60 | 0.55 | 0.13 |
| Millet | grain | 85 | kg / q | 0.60 | - | - |
| Orge | grain | 85 | kg / q | 0.65 | 0.55 | 0.15 |
| | paille | 88 | kg / t | 1.00 | 12.9 | 0.75 |
| Pois | grain | 86 | kg / q | 0.80 | 1.15 | 0.18 |
| | paille | 88 | kg / t | 2.10 | 19.0 | 2.05 |
| Pois chiche | grain | 86 | kg / q | 0.70 | 0.70 | 0.17 |
| Pomme de terre conso. | tubercule | 20 | kg / t | 0.95 | 3.90 | 0.30 |
| Pomme de terre féculé | tubercule | 26 | kg / t | 1.25 | 5.10 | - |
| Riz | grain ⁽⁵⁾ | 85 | kg / q | 0.60 | 0.30 | - |
| Seigle | grain | 85 | kg / q | 0.65 | 0.45 | 0.16 |
| | paille ⁽³⁾ | 86 | kg / t | 3.00 | 12.0 | 2.0 ⁽⁴⁾ |
| Soja | grain | 86 | kg / q | 1.00 | 1.60 | - |
| Sorgho | grain | 85 | kg / q | 0.70 | 0.35 | - |
| Tournesol | grain | 91 | kg / q | 1.20 | 1.05 | 0.45 |
| Triticale | grain | 85 | kg / q | 0.65 | 0.50 | 0.14 |
| | paille ⁽³⁾ | 88 | kg / t | 2.00 | 10.0 | 2.0 ⁽⁴⁾ |
| Vesce | grain | 85 | kg / q | 1.00 | 1.95 | - |
| | paille | 88 | kg / t | 2.00 | 12.7 | 1.30 |

(1) teneur de référence en MS pour l'organe considéré (conventionnelle ou habituelle à la récolte); cas particulier de la betterave sucrière pour tenir compte de l'unité conventionnelle de mesure des rendements

(2) quantité de P₂O₅, K₂O ou MgO par unité de masse de matière végétale à la teneur en MS de référence ; t = tonne métrique, q = quintal

(3) CORPEN, 1988, Bilan de l'azote à l'exploitation

(4) Düngeverordnung 2001 (tableau de référence réglementaire fédérale allemande)

(5) World Fertilizer Use Manual, IFA, 1992

Légumes de plein champ & tabac, teneur par unité de récolte

Liste restreinte étant donné le grand nombre d'espèces. Pour plus de détail, voir les documents cités dans la bibliographie ou les instituts techniques correspondants

| Espèce | Dest ⁽¹⁾ | Organe | % Mat. Sèche récolte ⁽²⁾ | Unité ⁽³⁾ de teneur | P ₂ O ₅ | K ₂ O | MgO |
|-----------------------------|---------------------|----------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------|------|
| Asperge | I & F | bourgeons | 13 | kg / t | 1.30 | 3.70 | 0.20 |
| Artichaut | F | têtes | 17 | kg / t | 1.30 | 5.75 | 0.50 |
| Brocoli | I | tête 18 cm | 8 | kg / t | 1.40 | 3.95 | 0.22 |
| Carotte jeune "Amsterdam" | I | racine | 9 | kg / t | 0.60 | 3.85 | 0.30 |
| Carotte grosse | I | racine | 12 | kg / t | 1.00 | 5.50 | 0.23 |
| Chou de Bruxelles | F | plante entière | 9 | kg / t | 2.00 ⁽⁴⁾ | 3.70 | 0.30 |
| Chou fleur automne | I | tête | 7 | kg / t | 1.00 | 3.30 | 0.20 |
| | F | tête couronnée | 8 | kg / t | 1.00 | 4.00 | 0.20 |
| Chou fleur hiver | I | tête | 9 | kg / t | 1.30 | 4.30 | 0.20 |
| | F | tête couronnée | 10 | kg / t | 1.20 | 4.00 | 0.20 |
| Chou pomme | F | tête | 12 | kg / t | 1.30 | 4.30 | 0.25 |
| Courgette | F | fruit | 7 | kg / t | 0.65 | 2.10 | 0.30 |
| Épinard | I | feuilles | 7 | kg / t | 1.10 | 7.05 | 0.65 |
| Haricot vert | I | gousse | 10 | kg / t | 1.05 | 3.65 | 0.45 |
| Haricot flageolet | I | grain | 43 | kg / q | 4.55 | 9.40 | 1.25 |
| Haricot | I | paille | 88 | kg / t | 2.60 | 24.1 | 3.95 |
| Maïs doux | I | épi | 30 | kg / t | 2.15 | 3.40 | 0.55 |
| Melon | F | fruit | | kg / t | 0.90 | 4.45 | 0.45 |
| Navet | F | racine | 6 | kg / t | 0.70 | 3.90 | 0.23 |
| Poireau d'hiver | F | fût & feuilles | 11 | kg / t | 0.80 | 4.20 | 0.20 |
| Pois de conserve | I | grain ventilé | 26 | kg / t | 2.95 | 4.00 | 0.70 |
| Pomme de terre ½ primeur | F | tubercule | 20 | kg / t | 1.00 | 7.20 | 0.40 |
| Pomme de terre prim'primeur | F | tubercule | 15 | kg / t | 0.75 | 4.50 | 0.30 |
| Tabac brun | I | feuilles | 79 | kg / t | 2.00 | 50.0 | - |
| Tabac Virginie | I | feuilles | 87 | kg / t | 2.50 | 30.0 | 5.00 |
| Tabac Burley | I | feuilles | 73 | kg / t | 3.00 | 80.0 | 10.0 |
| Tomate | F | fruit | 6 | kg / t | 0.50 | 2.90 | 0.20 |
| Salade type laitue | F | feuilles | 5 | kg / t | 0.55 | 3.50 | 0.18 |
| Salade type Batavia | F | feuilles | 5 | kg / t | 0.80 | 3.80 | - |

(1) destination : F = marché de frais ; I = industrie de transformation ; pour les légumes d'industrie, les références sont celles de l'UNILET ; pour les légumes pour marché "frais" les références sont issues des chambres d'agriculture de Bretagne et du CTIFL ; pour le tabac, les références sont issues de l'ANITTA. On a cherché à exprimer toutes les récoltes en unité de masse, bien que dans la pratique certaines unités très spécifiques subsistent pour les légumes frais

(2) teneur en MS de référence pour l'organe considéré (conventionnelle ou habituelle à la récolte)

(3) quantité de P₂O₅, K₂O ou MgO par quantité de matière végétale à la teneur en MS conventionnelle ou habituelle à la récolte ; t = tonne métrique, q = quintal

(4) Düngerverordnung 2001 (tableau de référence réglementaire fédérale allemande)

NB : dans le cas des cultures légumières, en particulier pour le marché de frais, une part importante de la biomasse exportée du champ peut être écartée de la vente suite aux opérations de nettoyage, calibrage, etc. Il faut en tenir compte en sus dans le calcul du bilan des minéraux à la parcelle car les données ci-dessus ne concernent que les organes récoltés et commercialisés.

Fourrages et cultures fourragères

Teneurs relatives à la matière sèche pour les fourrages et le maïs, à la matière fraîche pour betterave et chou

NB: les teneurs dépendent beaucoup du stade de développement, des conditions de récolte et des états de nutrition minérale de l'herbe. Pour des références plus détaillées, voir les tables AFZ-INRA (Sauvant et al, 2004) et INRA 2007 (réf. ci-dessous).

| Espèce | Type récolte | Valeurs observées par enquête | | | Valeurs "critiques" (2) | | Hypothèses t MS/coupe et (INN) |
|--------------------------------|--------------|--|---------------------------------|--------------------|--|---------------------------------|--------------------------------------|
| | | Kg P ₂ O ₅ par t MS | Kg K ₂ O par t MS | Kg MgO par t MS | Kg P ₂ O ₅ par t MS | Kg K ₂ O par t MS | |
| ● Brome | ensilage | 6.4 | - | 2.0 | 7.3 | 35.5 | 5 (0.9) |
| ● Dactyle | ensilage | 7.0 | - | 2.6 | 7.3 | 35.5 | 5 (0.9) |
| | foin | 5.1 | 24.6 | 2.7 | 6.2 | 30.8 | 4 (0.6) |
| ● Dactyle & Luzerne | foin | 5.0 (1) | 22.1 | - | 6.2 | 30.8 | 4 (0.6) |
| ● Fétuque élevée | ensilage | 6.6 | - | 2.7 | 7.3 | 35.5 | 5 (0.9) |
| | foin | 7.6 | - | - | 6.2 | 30.8 | 4 (0.6) |
| ● Luzerne | déshydratée | 5.8 | 31.8 | 2.2 | - | - | - |
| | ensilage | 6.0 | - | - | - | - | - |
| | foin | 6.3 | 26.2 | 3.9 | - | - | - |
| ● Prairie naturelle | pâturage | 7.1 | 25.9 | 2.7 | 7.4 | 36.2 | 2 (0.7) |
| | ensilage | 5.6 | - | 2.5 | 7.6 | 36.7 | 4 (0.9) |
| ● Prairie temporaire | foin | 6.9 | 29.9 | 2.6 | 6.5 | 32.0 | 3 (0.6) |
| | foin | 5.7 (1) | 26.5 | 3.6 | 6.2 | 30.8 | 4 (0.6) |
| ● Ray Grass anglais | pâturage | 6.8 | - | - | 9.2 | 43.4 | 2 (1.0) |
| | ensilage | 7.5 | - | - | 7.3 | 35.5 | 5 (0.9) |
| ● Ray Grass hybride | ensilage | 6.7 | 28.6 | 2.7 | 6.2 | 30.8 | 4 (0.6) |
| | foin | 6.8 | 44.1 | 2.6 | 7.3 | 35.5 | 5 (0.9) |
| ● Ray Grass italien | ensilage | 7.0 | 38.9 | - | 6.2 | 30.8 | 4 (0.6) |
| | foin | 7.4 | - | 2.3 | 7.3 | 35.5 | 5 (0.9) |
| ● Trèfle violet | ensilage | 8.4 | 33.7 | 1.8 | 6.2 | 30.8 | 4 (0.6) |
| | ensilage | 8.3 | - | 2.8 | - | - | - |
| ● Vesce | ensilage | 6.9 (1) | 22.7 | - | - | - | - |
| | foin | 2.3 | 14.4 | 1.5 | - | - | - |

(1) INRA 2007

(2) Les valeurs "critiques" sont calculées à partir d'équations (Thélier et al, 1999) permettant de définir l'état de nutrition P et K non limitant pour la croissance permise par l'azote. Les bases retenues pour le calcul (t MS par coupe et INN) figurent dans

la colonne de droite du tableau. L'Indice de Nutrition azotée (INN) est le rapport de la teneur en azote réelle de l'herbe à la teneur critique. Celle-ci correspond à la teneur minimale permettant d'assurer la vitesse de croissance maximale des plantes (INN=1 : azote non limitant de la croissance potentielle).

| Espèce | Organe | % MS récolte (1) | Unité de teneur | P ₂ O ₅ | K ₂ O | MgO |
|-------------------------------|------------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|------------------|------|
| ● Betterave fourragère | racine | 16 | kg / t | 0.55 | 1.95 | - |
| ● Chou fourrager | plante entière | 13 | kg / t | 0.90 (2) | 1.50 | - |
| ● Maïs | plante entière ensilée | 100 | kg / t | 4.20 | 11.9 | 1.85 |

(1) teneur de l'organe considéré en Matière Sèche, conventionnelle ou habituelle, à la récolte.

(2) INRA 2007

PRINCIPALES RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **COMIFER, 2007** : Teneurs en P, K et Mg des organes végétaux récoltables. Méthode d'établissement et valeurs de référence Comifer, Paris, 40 p. (11 p. et annexes)
- **Comité de Développement des agriculteurs de la zone légumière, 2002**, L'agronomie et la fertilisation, des cultures légumières. Chambre d'Agriculture du Finistère, 142 p.
- **INRA, 2007** : Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux - Valeurs des aliments. Tables Inra QUAE Editions, 307 p.
- **SAUVANT D., PEREZ J.M., TRAN G., 2004** : Tables de composition et de valeur nutritive de matières premières destinées aux animaux d'élevage ; 2nd édition. INRA Editions, 301 p.
- **Thélier-Huché L., Farrugia A., Castillon P., 1999** : L'analyse d'herbe, un outil pour le pilotage de la fertilisation phosphatée et potassique des prairies naturelles et temporaires. Institut de l'Élevage, ITCF, INRA, ACTA, Chambres d'Agriculture, COMIFER.
- **UNILET, 2006** : Guide fertilisation. N° Hors série de Unilet-Informations, 50 p.

FERTILISATION PK

GRILLE DE CALCUL DE DOSE

Coefficients à appliquer aux quantités d'éléments exportés prévisibles pour déterminer les quantités d'éléments à appliquer

Le COMIFER propose deux grilles de calcul de dose, pour P et pour K, version 2009, sous la forme de coefficients multiplicatifs des exportations pour les grandes cultures et les fourrages annuels ou pluriannuels (non permanents). Ce document s'adresse aux agriculteurs, aux techniciens, aux laboratoires d'analyse de terre et aux autres structures de conseil qui calculent ou fournissent des préconisations de dose PK.

Ces grilles ont été établies dans le prolongement de la nouvelle table des teneurs en P, K, et Mg des organes végétaux récoltés, publiée en 2007 par le COMIFER, et doivent être utilisées avec cette table.

Cette version 2009 a été construite dans la continuité des versions 1993⁽¹⁾ puis 1997⁽²⁾ de la méthode COMIFER, qu'elle remplace donc maintenant. Elle correspond aux principes édictés dans la brochure COMIFER de référence (1993), basés en grande partie sur les enseignements des essais de longue durée, alliant les deux objectifs généraux d'alimentation non limitante des cultures et de préservation de la fertilité P et K du sol à moyen terme.

Trois objectifs principaux ont guidé l'élaboration de cette version 2009 :

- Dans les sols à teneurs faibles en P ou en K, les coefficients multiplicatifs réévalués maintiennent les doses précédemment préconisées sur la base des résultats du réseau d'essais longue durée.
- Dans les sols à teneur élevée en P ou en K (teneur supérieure à Timpasse), les coefficients multiplicateurs ont été soit maintenus soit diminués, en privilégiant des valeurs inférieures ou égales à 1, conduisant à l'utilisation plus importante des réserves du sol pour l'alimentation des cultures. Par ailleurs, un seuil supplémentaire correspondant à la valeur de $3 \times$ Timpasse est défini, au-delà duquel les coefficients sont toujours égaux à 0, quels que soit le niveau des autres critères de raisonnement.
- Lorsque les résidus de récolte de la culture précédente sont enlevés (par exemple les pailles), la disponibilité en P mais surtout en K diminue pour la culture qui suit. Le supplément d'apport permettant de compenser les exportations de P et de K des pailles est alors attribué à la culture suivante et non pas à la culture précédente. Cette compensation ne s'envisage que dans les cas des sols qui n'ont pas une teneur élevée, c'est-à-dire lorsque la teneur du sol est inférieure au Timpasse.

Les valeurs des teneurs-seuils Timpasse et Trenforcé par classe d'exigence, définies régionalement par type de sol, ne sont pas modifiées, elles n'ont pas fait l'objet de révision.

$$\begin{array}{l} \text{Dose } P_2O_5 \\ \text{ou } K_2O \text{ conseillée} \\ \text{(en kg/ha)} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Coefficient multiplicatif} \\ \text{des exportations} \end{array} \times \begin{array}{l} \text{Rendement prévu} \\ \text{(unité de rendement aux normes)} \end{array} \times \begin{array}{l} \text{Teneur en } P_2O_5 \text{ ou } K_2O \text{ dans} \\ \text{les exportations (kg } P_2O_5 \text{ ou } K_2O \\ \text{par unité de rendement aux normes)} \end{array}$$

avec un supplément éventuel dû aux exportations de résidus du précédent

Le groupe PKMg du COMIFER, 2009

RAPPEL

La définition de la dose P et K dépend de 4 critères de raisonnement :

- L'exigence des cultures
- La teneur du sol à l'analyse de terre
- Le passé récent de fertilisation
- Les résidus de culture du précédent

Les coefficients multiplicatifs des exportations sont définis d'après les 3 premiers critères.

Des précisions pour une meilleure utilisation de cette grille sont disponibles sur le site du COMIFER : <https://comifer.asso.fr>

(1) COMIFER 1993 Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures

(2) COMIFER 1997 Éléments complémentaires à la méthode de raisonnement de la fertilisation PK permettant d'aider à sa mise en œuvre

Grille de calcul des doses de phosphore (P₂O₅) à apporter

Grille de coefficients multiplicatifs des exportations, appliquée à la récolte principale (grains le plus souvent)

| P ₂ O ₅ | Nb. d'années sans apport depuis la dernière fertilisation | Teneur du sol | | | | | | |
|--|---|--|--------|------------|-------|------------|----------|----------|
| | | Positionner la teneur par rapport aux seuils | | | | | | |
| | | Teneur faible | Trenf. | Timp. -10% | Timp. | Timp. +10% | 2x Timp. | 3x Timp. |
| Cultures très exigeantes Betterave sucrière Colza - Luzerne Pomme de terre | 0 | 2.2 | 1.5 | 1.2 | 1.0 | 0.8 | 0 | 0 |
| | 1 an | 3.3 | 2.0 | 1.5 | 1.2 | 1.0 | 0 | 0 |
| | 2 ans ou + | 3.7 | 2.7 | 2.0 | 1.5 | 1.2 | 0.8 | 0 |
| Moyennement exigeantes Blé/Blé - Blé dur Maïs fourrage - Pois Orge - R.G. - Sorgho | 0 | 1.6 | 1.0 | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 1 an | 1.8 | 1.2 | 1.0 | 1.0 | 0.8 | 0 | 0 |
| | 2 ans ou + | 2.0 | 1.7 | 1.5 | 1.2 | 1.0 | 0.6 | 0 |
| Cultures peu exigeantes Avoine - Blé tendre Maïs grain - Seigle Soja - Tournesol | 0 | 1.3 | 1.0 | 0.8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 1 an | 1.6 | 1.0 | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 ans ou + | 1.6 | 1.2 | 1.0 | 1.0 | 0.8 | 0 | 0 |

► Cette grille P s'applique à toutes les cultures y compris fourragères, à leur récolte principale, mais ne s'applique pas aux résidus à enlèvement facultatif (pailles).

► Si les résidus de la culture précédente sont récoltés (paille, fanes...), un supplément de dose est proposé selon la règle suivante :

- pas de supplément en cas de sol à teneur élevée (teneur > Timp) qu'il y ait un conseil de dose nulle ou non d'après la grille ;
- le supplément correspond à l'exportation de P₂O₅ des pailles sur la culture qui suit dans les autres cas (teneur < Timp).

Supplément de kg P₂O₅/ha sur la culture qui suit = Masse de résidus récoltés (t/ha) × teneur en kg P₂O₅/t

Grille de calcul des doses de potassium (K₂O) à apporter (grandes cultures)

Grille de coefficients multiplicatifs des exportations, appliquée à la récolte principale (grains le plus souvent)

| K ₂ O | Pour toute destination des résidus du précédent | Nb. d'années sans apport depuis la dernière fertilisation | Teneur du sol | | | | | |
|--|---|---|--|--------|------------|-------|------------|----------|
| | | | Positionner la teneur par rapport aux seuils | | | | | |
| | | | Teneur faible | Trenf. | Timp. -10% | Timp. | Timp. +10% | 2x Timp. |
| Cultures très exigeantes Betterave sucrière Pomme de terre | 0 | 1.7 | 1.2 | 1.0 | 0.8 | 0.6 | 0 | 0 |
| | 1 an | 2.0 | 1.4 | 1.2 | 1.0 | 0.8 | 0 | 0 |
| | 2 ans ou + | 2.3 | 1.5 | 1.4 | 1.2 | 1.0 | 0.8 | 0 |
| Moyennement exigeantes Colza - Maïs grain Pois - Tournesol Luzerne | 0 | 1.6 | 1.2 | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 1 an | 2.2 | 1.4 | 1.2 | 1.0 | 0.5 | 0 | 0 |
| | 2 ans ou + | 2.2 | 1.6 | 1.4 | 1.2 | 1.0 | 0.8 | 0 |
| Cultures peu exigeantes Blé tendre - Blé dur Orge - Avoine - Seigle | 0 | 1.2 | 1.0 | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 1 an | 1.2 | 1.1 | 1.0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 ans ou + | 1.2 | 1.2 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0 | 0 |

► Cette grille K s'applique à toutes les grandes cultures, à leur récolte principale mais ne s'applique pas aux résidus à enlèvement facultatif (pailles).

► Pour ces cultures, la dose sera plafonnée à 400 kg K₂O/ha/an.

► Si les résidus de la culture précédente sont récoltés (paille, fanes...), un supplément de dose est proposé selon la règle suivante :

- pas de supplément en cas de sol à teneur élevée (teneur > Timp) qu'il y ait un conseil de dose nulle ou non d'après la grille ;
- le supplément correspond à l'exportation de K₂O des pailles sur la culture qui suit dans les autres cas (teneur < Timp).

Supplément de kg K₂O/ha sur la culture qui suit = Masse de résidus récoltés (t/ha) × teneur en kg K₂O/t.

Grille de calcul de dose de potassium (K₂O) à apporter sur les cultures fourragères (récolte plante entière)

| K ₂ O | Cas des fourrages | Pour toute destination des résidus du précédent | Nb. d'années sans apport depuis la dernière fertilisation | Teneur du sol | | | | | |
|--|-------------------|---|---|--|--------|------------|-------|------------|----------|
| | | | | Positionner la teneur par rapport aux seuils | | | | | |
| | | | | Teneur faible | Trenf. | Timp. -10% | Timp. | Timp. +10% | 2x Timp. |
| Cultures Moyennement exigeantes Maïs fourrage Ray-Grass - Luzerne | 0 | 1.0 | 1.0 | 0.8 | 0.6 | 0 | 0 | 0 | |
| | 1 an | 1.5 | 1.2 | 1.0 | 0.8 | 0.6 | 0 | 0 | |
| | 2 ans ou + | 1.5 | 1.2 | 1.0 | 1.0 | 0.8 | 0.4 | 0 | |

► En cas de sol n'ayant pas une teneur élevée (teneur < Timp), la dose sera partagée entre avant et après la culture fourragère.

► Pour les cultures fourragères, la dose est plafonnée à 200 kg K₂O/ha ; des suppléments de dose au-delà n'ont jamais été valorisés dans les essais de longue durée.

ANNEXE 3 : EXEMPLES DE CALCULS - SITUATIONS DE COMPLEXITÉ CROISSANTE

Un agriculteur procède, après récolte de sa culture de blé (rendement obtenu de 65 quintaux par hectare à 15% d'humidité), à une analyse de terre sur une parcelle de son exploitation. Les sols de l'exploitation, située en région Bretagne – Pays de Loire, sont des limons caillouteux superficiels. La culture de blé n'avait été fertilisée ni en phosphore, ni en potassium. Les informations utiles au raisonnement de la fertilisation P et K ont été extraites des résultats de l'analyse et reportés dans le tableau 3.1.

| Argile | Limons | Sables | K ₂ O _{échangeable} | P ₂ O ₅ Dyer |
|--------|--------|--------|---|------------------------------------|
| % | | | mg. kg ⁻¹ | |
| 10 | 70 | 20 | 160 | 250 |

Tableau 3.1 : Résultats de l'analyse de terre utiles à prendre en compte pour le raisonnement de la fertilisation en phosphore et en potassium

Selon les cas précisés dans le tableau 3.2, et en s'appuyant sur les annexes 1 et 2, quelles sont les conclusions du diagnostics et de la préconisation, respectivement ?

Les engrais proposés pour l'exercice sont le triple super phosphate (TSP) et le chlorure de potassium (KCl)¹.

| Cas | Culture suivant l'analyse et rendement prévisionnel en quintaux par ha Seigle : 50 qtx / ha PdT : 40 t / ha Tournesol : 35 qtx / ha | Devenir des résidus du précédent blé | Nombre d'années sans apport d'engrais | Utilisation d'un PRO en complément de la fertilisation (disponibilité des éléments en première année) | Type d'engrais utilisé (disponibilité en % des éléments en première année) | |
|-----|--|--------------------------------------|---------------------------------------|---|--|-----------|
| 1 | Seigle | enfouis | 1 an | Non | TSP (100) | KCl (100) |
| 2 | Pomme de terre | enfouis | 1 an | Non | TSP (100) | KCl (100) |
| 3 | Tournesol | enfouis | 1 an | Non | TSP (100) | KCl (100) |
| 4 | Seigle | Exportés 5 t / ha | 1 an | Non | TSP (100) | KCl (100) |
| 5 | Seigle | enfouis | 3 ans | Non | TSP (100) | KCl (100) |
| 6 | Seigle | enfouis | 3 an | 20 t.ha ⁻¹ Fumier (60% pour le P) | TSP (100) | KCl (100) |

Tableau 3.2 : Succession des cas à traiter, par ordre croissant de complexité.

TSP : Triple Super Phosphate - KCl : Chlorure de Potassium

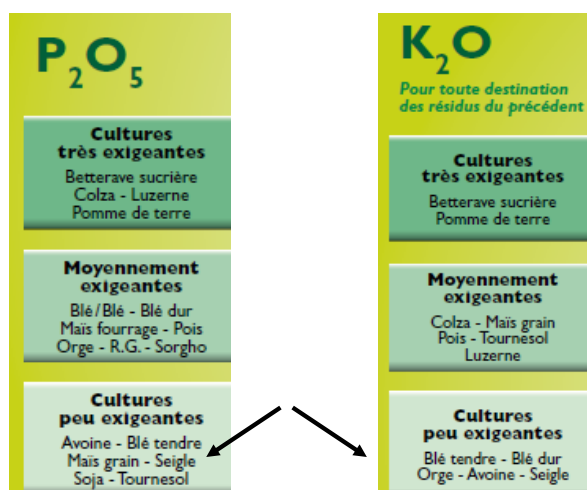
¹ De manière générale, l'apport d'un engrais simple ou composé contenant du phosphore soluble sera calculé selon le % déclaré en P₂O₅ de cet engrais et la quantité à apporter en kg de P₂O₅/ha. De la même façon, l'apport d'un engrais simple ou composé contenant du potassium soluble dans l'eau sera calculé selon le % déclaré en K₂O de cet engrais et la quantité à apporter en kg de K₂O/ha. Les calculs se fondent sur l'hypothèse que les produits sont entièrement solubles.

Cas 1 - Résolution d'un cas simple : culture peu exigeante en P et K

La culture de seigle est classée comme peu exigeante vis-à-vis du phosphore et du potassium (annexe 2 – grille de calcul des doses). Les seuils sur les sols à considérer seront ceux associés à ce niveau d'exigence.

La teneur du sol en P_2O_5 (250 mg / kg, extraction à la méthode Dyer), se situe au-dessus du seuil d'impasse présenté sur l'annexe 1, fixé à 240 mg P_2O_5 / kg. Quant à la valeur de l'analyse K_2O , elle se situe en-dessous du seuil d'impasse (Timp).

NB : Attention, pour le phosphore, les valeurs-seuils sont différentes en fonction de la méthode d'extraction utilisée.



| Exigence de la culture --> | Seuils P_2O_5 , en mg/kg - Méthode Dyer | | | | | |
|----------------------------------|---|----------|------------------|----------|-----------------|----------|
| | Forte exigence | | Moyenne exigence | | Faible exigence | |
| | Trenforcé | Timpasse | Trenforcé | Timpasse | Trenforcé | Timpasse |
| Limons caillouteux superficiels. | 190 | 250 | 170 | 250 | 140 | 240 |

Analyse : 250

| Exigence de la culture --> | Seuils K_2O échangeable, en mg/kg | | | | | |
|----------------------------------|-------------------------------------|----------|------------------|----------|-----------------|----------|
| | Forte exigence | | Moyenne exigence | | Faible exigence | |
| | Trenforcé | Timpasse | Trenforcé | Timpasse | Trenforcé | Timpasse |
| Limons caillouteux superficiels. | 190 | 320 | 140 | 200 | 100 | 170 |

Analyse : 160

On diagnostique donc *a priori* (par définition du seuil d'impasse) une possible absence de fertilisation de la culture en phosphore, mais la nécessité de fertiliser en potassium. Cette première étape de diagnostic doit cependant être corrigée par la durée d'absence d'apport avant la culture. On se reporte à l'annexe 2 (grille de calcul des doses) et on considère la ligne relative au nombre d'années sans apport depuis la dernière fertilisation.

| P_2O_5 | Nb. d'années sans apport depuis la dernière fertilisation | Teneur du sol | | | | | |
|---|---|---------------|--|-------|------------|----------|---------------|
| | | Teneur faible | Positionner la teneur par rapport aux seuils | | | | Teneur élevée |
| | | Trenf. | Timp. -10% | Timp. | Timp. +10% | 2x Timp. | 3x Timp. |
| | | 140 | 216 | 240 | 264 | 480 | 720 |
| | | | | 250 | | | |
| Cultures peu exigeantes Avoine - Blé tendre Maïs grain - Seigle Soja - Tournesol | 0 | 1.3 | 1.0 | 0.8 | 0 | 0 | 0 |
| | 1 an | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 ans ou + | 1.6 | 1.2 | 1.0 | 1.0 | 0.8 | 0 |

Pour le phosphore, et pour une culture peu exigeante, en ne considérant qu'une année sans apport de fertilisants, le coefficient multiplicateur à appliquer aux quantités exportées par la culture à venir est égal à «0». Il n'y a aucun apport à effectuer (impasse).

Cas 2 - Culture exigeante en P et K

La pomme de terre est considérée comme «très exigeante» à la fois vis-à-vis du phosphore, mais aussi du potassium (annexe 2 – Grille de calcul des doses): les teneurs du seuil de renforcement (Trenf) et d'impasse (T imp) vont être différentes du cas 1 (annexe 1). Pour une culture très exigeante, les seuils sont plus élevés.

Pour le phosphore, le seuil mesuré (250 mg P_2O_5 Dyer / kg) correspond (exactement) au seuil dit «d'impasse». Dans ce cas-là, pour minimiser la prise de risque, le coefficient le plus fort sera appliqué. Compte tenu d'un rendement prévu de 50 t / ha, les quantités correspondant exactement aux exportations sont (annexe 2) de $1.5 \times 50 \text{ t / ha} \times 0,95 \text{ kg } P_2O_5 / \text{t} = 71 \text{ kg } P_2O_5 / \text{ha}$, soit 158 kg / ha d'un engrais de type «triple-superphosphates» titrant à 45% de P_2O_5 ($71 / 0,45 = 158$).



Pour le potassium, la concentration mesurée est en-deça du seuil de renforcement pour une culture très exigeante; dans la situation d'une année sans fertilisation, le coefficient qui s'applique vaut donc «2» (annexe 2 – Grille de calcul des doses). Compte tenu du rendement de 50 t / ha, les quantités de K_2O à apporter valent $2 \times (50 \text{ t / ha} \times 3,9 \text{ kg } K_2O / \text{t}) = 390 \text{ kg } K_2O / \text{ha}$. Cette valeur, importante, est néanmoins inférieure au plafond fixé à 400 kg K_2O / ha (annexe 2 – Grille de calcul des doses). En engrais KCl (60% de K_2O), cette quantité est équivalente à 650 kg par hectare ($390 / 0,6$). Les pailles du blé ayant été enfouies, il est inutile de majorer la dose prescrite, par le K qui aurait pu ainsi être exporté par les pailles à la récolte de la culture précédente.

Cas 3 – Culture peu exigeante en P et moyennement exigeante en K

Le tournesol est considéré comme «moyennement exigeant» en potassium et «peu exigeant» en phosphore (annexe 2 – Grille de calcul des doses).

Pour le phosphore, la valeur mesurée (250 mg Dyer / kg) est au-dessus du seuil d'impasse (240 mg / kg, annexe 1). On diagnostique donc *a priori*, par définition, une possible impasse en phosphore.

Cette première étape de diagnostic doit être corrigée par la durée d'absence d'apport. Compte tenu du nombre d'année sans fertilisation («1»), le coefficient multiplicateur est égal à 0. Il n'y a donc aucun apport à effectuer (impasse).



Pour le potassium, la valeur mesurée (160 mg / kg) se situe entre le seuil de renforcement (Trenf = 140 mg / kg) et le seuil d'impasse (Timp = 200 mg / kg). Plus précisément, la valeur mesurée se situe entre le seuil de renforcement et le seuil «Timp-10%» ($200 - 20 = 180 \text{ mg / kg}$). Dès lors, le coefficient multiplicateur qui s'applique est «1,4» pour les apports en potassium (une seule année sans apport de fertilisants). Compte tenu du rendement attendu (35 qtx / ha,) et de la teneur en K_2O du tournesol (1,05 kg K_2O / qtl, annexe 2 – Teneur des récoltes), la quantité de K_2O à apporter vaut $1,4 \times (35 \text{ qtx / ha} \times 1,05 \text{ kg } K_2O / \text{qtl}) = 51 \text{ kg } K_2O / \text{ha}$, soit 85 kg d'engrais KCl / ha ($51 / 0,6$).

Cas 4 – Exportation des pailles en culture précédente

Se reporter au «cas 1» pour les détails des calculs de base. Dans ce nouveau cas, 5 tonnes de pailles ont été exportées après la récolte de la culture de blé précédente.

Le diagnostic et le conseil sont identiques au cas n°1, à savoir une impasse possible en P_2O_5 et conseil de 22,5 kg K_2O .

Même si les résidus de la culture précédente ont été exportés (cela correspond à 5 tonnes de pailles X 1,7 kg P_2O_5 / t = 6,5 kg P_2O_5 / ha), on ne majore pas la dose pour tenir compte de l'exportation des pailles de la culture précédente si la dose calculée est nulle (annexe 2 – Teneur des récoltes).



Pour le potassium, compte tenu de son exportation comprise dans les 5 tonnes de pailles enlevées en culture précédente et du fait que la teneur mesurée est inférieure au T impasse des cultures peu exigeantes, un calcul de majoration doit être effectué: il représente 5 t / ha X 12,3 kg K_2O / t soit 61,5 kg K_2O / ha. La quantité calculée précédemment est à majorer par le potassium exporté, soit un total de 22,5 + 61,5 = 84 kg K_2O / ha, équivalent à 140 kg KCl / ha. (84 / 0,6).

Cas 5 – Absence longue de fertilisation

Se reporter au «cas 1» pour les détails des calculs de base. Dans ce nouveau cas, le dernier apport de fertilisants remonte à plus de 2 ans.

La valeur de P_2O_5 de l'analyse (méthode Dyer) se situe au-dessus du seuil d'impasse présentée sur l'annexe 1, fixé à 240 mg P_2O_5 / kg. Quant à la valeur de K_2O , elle se situe en-dessous du seuil d'impasse Timp.

On diagnostique donc *a priori* (par définition du seuil d'impasse) une possible absence de nécessité de fertiliser la culture en phosphore, et la nécessité en tous cas de fertiliser en potassium. Mais cette première étape de diagnostic doit être corrigée par la durée d'absence d'apport avant la culture, en considérant la ligne relative au nombre d'années sans apport depuis la dernière fertilisation (ligne «2 ans ou +»).



Pour le phosphore, en considérant au moins deux années sans apport de fertilisants, le coefficient multiplicateur à appliquer aux quantités à exporter par la culture à venir n'est plus nul, et dépend de l'écart entre le seuil d'impasse et la quantité mesurée. Cette dernière est ici comprise dans la fourchette des 10% au-dessus du seuil d'impasse (240 + 24 = 264, supérieur à la mesure de 250). Le coefficient est donc égal à «1» (annexe 2 – Grille de calcul des doses). Compte tenu d'un rendement prévu de 50 t / ha, les quantités correspondant exactement aux exportations sont (annexe 2 – Teneurs des récoltes) de 50 t / ha X 0,65 kg P_2O_5 / t = 32,5 kg P_2O_5 / ha, soit 72 kg / ha d'un engrais de type «triple-superphosphates» (32,5 / 0,45).

Pour le potassium, l'écart entre la valeur mesurée et le seuil d'impasse (Timp) est égal à 10, donc inférieur à 17 qui représente 10% en dessous de la valeur du seuil. Dès lors, le coefficient multiplicateur qui s'applique reste à «1» pour les apports en potassium, malgré la date reculée du dernier apport de fertilisant. La quantité à apporter est donc équivalente à une fois les exportations du seigle, prévu au Rdt de 50 qtx / ha. Le calcul se décompose comme suit: 50 qtx / ha X 0,45 kg K_2O / qtl = 22,5 kg K_2O / ha. En engrais KCl (60% de K_2O), cette quantité est équivalente à 38 kg par hectare (22,5 / 0,6).

Cas 6 – Fertilisation récente par l'utilisation de fumier

Se reporter au « cas 5 » pour les détails des calculs de base du diagnostic, qui préconisait un apport de « 1 » fois les exportations en phosphore et en potassium, soit 32,5 kg P_2O_5 / ha et 22,5 kg K_2O / ha, respectivement. Du fumier est épandu et sera complété, si nécessaire, par de la fertilisation minérale. Les quantités épandues sont de 20 tonnes par hectare. L'analyse de terre s'est faite avant l'apport de fumier. La composition du fumier est rappelée dans le tableau 3.4, donné à titre d'exemple.



| | P_2O_5 | K_2O |
|--|----------|--------|
| Teneur (kg P_2O_5 et K_2O / tonne de fumier) | 3,1 | 8,1 |
| Coefficient équivalent-engrais (%) | 60 | 100 |

Tableau 3.4 : Exemple de composition en phosphore et en potassium d'un fumier utilisé en complément des engrais minéraux.

Dans cet exemple, le phosphore du fumier possède une biodisponibilité en première année (ou un coefficient d'équivalence engrais TSP) de 60%. Compte tenu de sa teneur en P_2O_5 , 20 tonnes de fumier apporteront au total $(20 \times 3,1) = 62$ kg P_2O_5 / ha, dont $(62 \times 0,6) = 37$ kg P_2O_5 / ha utilisable par la culture de seigle.

Quant au potassium, l'apport de 20 tonnes de fumier permettra au seigle d'utiliser $(20 \times 8,1) = 162$ kg K_2O / ha d'une forme intégralement disponible. Le large excès de potassium (huit fois trop) consituera un reliquat et devra être intégré dans le raisonnement des futures fertilisations. Il sera aussi éventuellement mesurable par une analyse ultérieure, si celle-ci se réalise avant que le stock n'ait gagné les couches plus profondes du sol, essentiellement limoneux.

L'utilisation de produits de recyclage comme fertilisants des cultures montre la difficulté de répondre précisément aux besoins des cultures en utilisant des produits dont l'équilibre en minéraux peut être loin des besoins des plantes à satisfaire. Excès ou déficits sont souvent inévitables.

La fertilisation

P – K – Mg

Les bases du raisonnement



La fertilisation P – K – Mg

Les bases du raisonnement

ÉDITION 2019

Le raisonnement de la fertilisation des éléments phosphore (P), potassium (K) et magnésium (Mg) est effectué en France en suivant des principes essentiellement énoncés à la fin des années 1990 par le COMIFER. Cette brochure, destinée à un large public, vise à expliciter ce raisonnement. Elle constitue une version résumée et actualisée du premier guide paru en 1995 (« Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphatée et potassique des grandes cultures »).

Après avoir rappelé les fondements scientifiques des notions de « besoins » des plantes et de biodisponibilité des sols en P, K et Mg, la brochure détaille point par point le raisonnement de la méthode, basé sur un diagnostic, une préconisation brute et un ajustement selon le type de matière fertilisante employée.

Cette brochure explique comment adapter le raisonnement à la multiplicité des cas rencontrés, que ce soit au niveau des pratiques (suppression du labour, localisation des engrais ...) ou des types de matières fertilisantes, tout en adoptant le même mode de raisonnement.

L'ensemble des tables nécessaire à l'établissement d'un conseil de fertilisation P-K est présent en annexes de cette brochure. Ces tables sont suivies de la présentation de cas pratiques, sous la forme d'exercices corrigés, abordant de nombreuses situations contrastées.

LA FERTILISATION P – K – Mg - Octobre 2019

ISBN 978-2-910393-10-6



9 782910 393106

Editions COMIFER