

3. Raisonnement de la fertilisation

Pour améliorer ou préserver la **fertilité** des sols de son exploitation, l'agriculteur peut utiliser des matières fertilisantes : les **engrais** et les **amendements**.

3.1. Notion de fertilité

La fertilité d'un sol est sa capacité à produire des récoltes ayant un rendement élevé et de bonne qualité. Cette capacité repose sur un ensemble de propriétés du sol lui-même, telles la texture, la structure, la profondeur, la réaction du sol, sa teneur en éléments nutritifs, en humus, ses propriétés de sorption et ses teneurs éventuelles en éléments toxiques.

3.2. La fertilisation

La fertilisation est un ensemble de techniques culturales consistant à apporter aux cultures des éléments minéraux dans le but de satisfaire leurs besoins. L'apport de matières fertilisantes (engrais et amendements) a pour buts :

- de créer, améliorer ou maintenir les caractéristiques biologiques et physico-chimiques du sol (optimiser l'absorption) ;
- de compléter les éléments fournis par le sol afin que les cultures disposent tout au long de leur cycle végétatif d'une quantité suffisante de nutriments assimilables pour satisfaire leurs besoins.

Le raisonnement de la fertilisation d'un peuplement végétal suppose ainsi la double connaissance des **besoins des plantes** d'une part, et de **l'offre du sol** d'autre part.

3.3. Les matières fertilisantes

Les matières fertilisantes sont habituellement regroupées en deux catégories : les amendements et les engrais.

Les **amendements** sont des substances destinées à améliorer l'ensemble des propriétés des sols : propriétés physiques, chimiques et biologiques. Parmi les amendements, on distingue d'une part les matières minérales, d'autre part les matières organiques.

Les **engrais** sont des substances minérales ou organiques (de synthèse), destinées à fournir aux plantes, un ou plusieurs éléments destinés à compléter les fournitures en provenance du sol.

Certains amendements, contiennent des éléments qui participeront à la nutrition des plantes alors qu'ils étaient destinés dans un premier temps à l'amélioration des propriétés du sol.

3.4. Lois de fertilisation

Les principes de la fertilisation minérale reposent en partie sur trois lois fondamentales qui décrivent notamment les effets de l'apport d'éléments fertilisants aux cultures.

3.4.1. Loi des restitutions

La loi des restitutions peut être énoncée ainsi : **pour éviter l'épuisement des sols cultivés, les exportations d'éléments minéraux doivent être compensées par des restitutions.** La fertilisation doit donc apporter suffisamment d'éléments minéraux pour compenser ceux qui sont soustraits au sol par l'enlèvement des récoltes (grains, racines ou plantes entières) et par les pertes subies dans l'environnement (lessivage...).

Deux notions sont à différencier :

Les **prélèvements totaux** correspondent à la quantité maximale contenue dans la plante, au moment où elle en renferme le plus.

Les **exportations**, c'est-à-dire les quantités soustraites au cycle des éléments par les récoltes, sont en général inférieures aux prélèvements car les plantes restituent des éléments en fin de cycle de végétation, en particulier par les résidus de récolte (racines, tiges...).

En **fertilisation raisonnée**, la mesure des exportations sert de base pour les calculs de fumure en phosphore et potassium, celle du prélèvement maximal est utilisée pour le raisonnement de la fertilisation azotée. Le prélèvement total en K est très supérieur au prélèvement à la récolte car les plantes restituent beaucoup d'éléments en fin de cycle de végétation. L'importance des restitutions après la récolte (prélèvement à la récolte – exportations) dépend surtout de la destination des résidus de récolte et des organes récoltés (grains, racines, plante entière, etc.).

Au niveau de la parcelle, il y a des pertes en éléments minéraux dues à plusieurs mécanismes :

a. Le lessivage

Il peut être important pour l'azote, le magnésium, le soufre et le calcium. Il est plus faible pour le potassium et quasiment nul pour le phosphore. Le lessivage est très variable selon le climat, la nature du sol (important en sol sableux et faible en sol argileux), la nature des engrais utilisés et les couverts végétaux. Presque inexistant dans les prairies, il est élevé dans les sols nus ;

b. La rétrogradation

Le phosphore peut être rétrogradé plus ou moins fortement selon les sols sous forme de composés très peu solubles tels des phosphates de fer et d'aluminium en milieu acide et des phosphates calciques en milieu calcaire ;

c. La consommation de luxe

Les plantes peuvent aussi faire une consommation supérieure à leurs besoins de certains éléments (N et plus rarement K).

D'autres mécanismes, à l'inverse, peuvent compenser en partie ces pertes. C'est le cas de la fourniture d'azote par des bactéries (azotobacter, rhizobium) ou de la libération progressive des réserves du sol, solubilisées grâce à l'activité biologique.

3.4.2. Interactions et loi des facteurs limitants

a. Facteur limitant

Un facteur de croissance est dit « limitant » quand l'augmentation de sa quantité mise à la disposition du peuplement entraîne une augmentation de la croissance ou du rendement de celui-ci. Cette définition ne concerne pas seulement les éléments minéraux, mais tous les facteurs de croissance c'est-à-dire également la lumière, ou le gaz carbonique.

b. Interaction

L'action d'un élément minéral peut être modifiée par la présence ou l'absence d'un ou plusieurs autres éléments. L'effet de ces interactions peut être positif ou négatif. Cette loi d'interaction met en évidence l'interdépendance entre les différents éléments nutritifs. L'insuffisance ou l'excès d'un élément peut limiter la croissance des végétaux.

Exemple :

Le tableau 3 donne les rendements d'une culture pour différentes combinaisons de doses d'engrais azoté et phosphaté. Il y a une interaction positive entre l'action de l'azote et celle du phosphore. Par rapport au témoin 60 N-50 P₂O₅ :

- L'effet de l'augmentation de la dose d'azote est de $67 - 55 = + 12$ q,
- L'effet de l'augmentation de la dose de phosphore est de $58 - 55 = + 3$ q,
- L'effet de l'augmentation des doses des 2 éléments est de $75 - 55 = + 20$ q,

C'est-à-dire plus que la somme des effets de l'application séparée des mêmes doses (12 + 3).

Tableau 3 : Effets de l'interaction entre l'azote et le phosphore sur le rendement d'une culture

	60 kg/ha de N	120 kg /ha de N
50 kg /ha de P ₂ O ₅	55 q	67 q
100 kg /ha de P ₂ O ₅	58 q	75 q

Parmi les exemples les plus courants d'interactions négatives, on peut citer la carence en magnésium due à un excès de potassium, la carence en zinc due à un excès de phosphore ou encore la carence en potassium par un excès de calcium et de magnésium.

3.4.3. Loi des accroissements de rendements moins que proportionnels

Si on augmente les apports d'un élément déficitaire, on constate dans un premier temps une augmentation du rendement (figure 5). Dans un deuxième temps, cet effet se ralentit puis cesse : l'apport croissant d'engrais n'augmente plus le rendement. Au-delà, l'effet peut même être négatif et le rendement peut baisser (à cause de phénomènes de toxicité, de la sensibilité à la verse et aux maladies ou encore des retards de maturité). Cette loi peut être résumée ainsi : **à une augmentation croissante de fertilisants correspond une augmentation de rendement de plus en plus faible.**

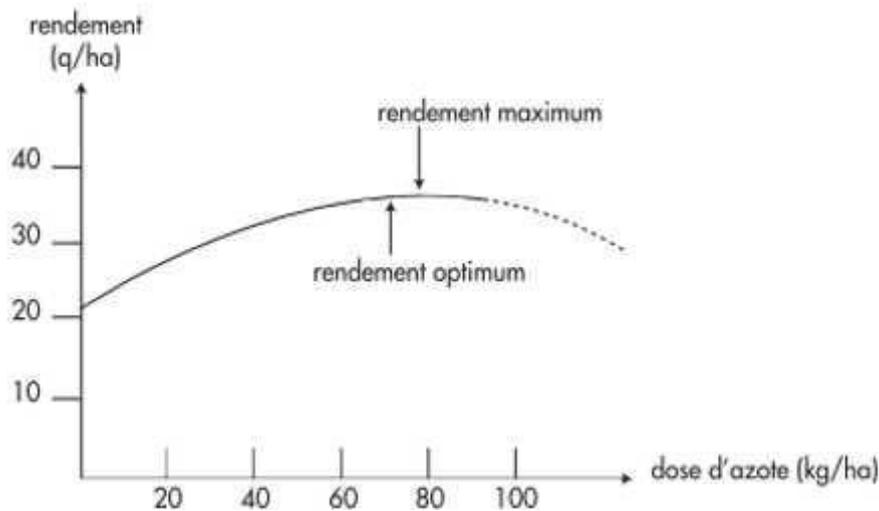


Figure 5 : Evolution du rendement en fonction des apports azotés (Source : Deblay & Charonnat, 2006)

3.5. Raisonnement de la fertilisation azotée

3.5.1. Rôles agronomiques de l'azote

L'azote est l'élément clé dans le processus de nutrition des plantes. Il intervient dans la synthèse des protéines, de la chlorophylle et d'autres composés majeurs déterminants dans le métabolisme végétal. Il est par conséquent le facteur principal de la croissance des plantes et du rendement des cultures. Il tend par contre à prolonger la durée du fonctionnement des organes verts, à retarder la sénescence et la maturation ; il contribue souvent à un affaiblissement des résistances mécaniques de la plante (verse des céréales) et à leur conférer une plus grande sensibilité à certaines maladies cryptogamiques.

3.5.2. Comportement de l'azote dans les sols

Dans les sols, l'azote se trouve présent sous trois formes principales : les formes organiques, ammoniacale et nitrique.

a. L'azote organique

Il constitue la majeure partie de l'azote du sol. Il résulte de la matière organique du sol à laquelle s'agrège ce qui provient des résidus de culture ou des déjections animales. Il n'est pas utilisé directement par la plante cultivée (réserve azotée du sol), jusqu'à ce qu'il soit minéralisé sous formes minérales ammoniacale et nitrique, grâce à l'action de bactéries du sol. Cette minéralisation se déroule en deux

principales étapes, l'ammonification ($N \text{ organique} \rightarrow NH_4^+$) et la nitrification ($NH_4^+ \rightarrow NO_3^-$). Le rythme des minéralisations varie suivant la nature de la matière organique et de l'humus présent dans le sol, suivant le climat (température et humidité du sol), suivant les conditions physico-chimiques qui influencent la vie microbienne, elle-même responsable de la minéralisation. En moyenne, on peut compter des rythmes de minéralisation de l'ordre de 1 à 10 % de la masse totale de la matière organique dosée dans le sol, donc des libérations annuelles de l'ordre de 20 à 800 kg d'azote minéral par ha et par an, le plus souvent de 40 à 240 kg N.

b. L'azote ammoniacal (NH_4^+)

Il s'agit d'une forme minérale, souvent transitoire, soluble dans l'eau et bien retenue par les colloïdes du sol. De charge électro-négative il est ainsi soumis aux lois d'échanges des cations, et n'est pas soumis au lessivage par l'eau d'infiltration. Il provient de la minéralisation de la matière organique ou d'un apport d'engrais organique ou ammoniacal. L'ion NH_4^+ est transformé rapidement en azote nitrique NO_3^- .

c. L'azote nitrique (NO_3^-)

Il s'agit de la forme minérale la plus oxydée ; très soluble dans l'eau, elle est facilement absorbée par la plante et mal retenue par le complexe absorbant du sol, donc mobile avec l'eau du sol. L'azote nitrique va ainsi pouvoir subir un lessivage, un entraînement en profondeur, dans les périodes de drainage des eaux ; c'est surtout le cas en période hivernale avec forte pluviométrie et faible évapotranspiration. A l'opposé, en périodes sèches, l'azote nitrique est susceptible de remonter par capillarité jusqu'à la surface ou dans les couches superficielles du sol.

3.5.3. Bilan azoté et calcul de la fumure

Afin de pouvoir déduire les quantités qui devront être apportées par les engrais minéraux et le calendrier de ces apports, il est important de connaître le rythme de libération dans le sol de l'azote minéral à partir de la matière organique. Sachant qu'un apport excessif en azote a pour conséquences une absorption trop importante par la plante, suivi de pertes importantes de rendement et un accroissement des risques de perte soit par lessivage (sous forme de NO_3^-) soit par volatilisation vers l'atmosphère (sous forme de

NH₃ ou NO₂). A l'inverse, tout manque d'azote minéral dans le sol lors d'une période de besoins critiques de la plante va se traduire par une perte de croissance et de rendement.

- Méthode du bilan

Le calcul de la fumure azoté à apporter est basé sur le bilan de l'azote minéral du sol. Cette méthode, consiste à calculer la quantité d'engrais à apporter à une parcelle cultivée en fonction d'une évaluation des besoins de la culture et les apports qui peuvent être fournis par le sol et ceux apportés par les exploitants au cours de la campagne culturale.

La dose à apporter est calculée globalement comme suit :

Dose totale d'azote à apporter = besoins de la culture - fournitures du sol - les apports organiques

- Ecriture opérationnelle

Ecriture simplifiée de l'équation du bilan azoté :

$$X = ([Pf + Rf] - [Pi + Ri + Mh + Mhp + Mr + MrCI]) / CAU - Xa$$

X : Apport d'azote sous forme d'engrais minéral de synthèse : dose totale à apporter

Pf : Quantité d'azote absorbé par la culture à la fermeture du bilan (besoins de la plante)

Rf : Reliquat d'azote minéral dans le sol à la fermeture du bilan

Pi : Quantité d'azote absorbé par la culture à l'ouverture du bilan

Ri : Reliquat azoté à l'ouverture du bilan

Mh : Minéralisation nette de l'humus du sol

Mhp : Minéralisation nette due à un retournement de prairie

Mr : Minéralisation nette de résidus de récolte

MrCI : Minéralisation nette de résidus de cultures intermédiaires

CAU : Coefficient apparent d'utilisation de l'engrais

Xa : Equivalent engrais minéral d'un produit organique

Ainsi le raisonnement de la fertilisation azotée se déroule en trois étapes :

Estimation des besoins de la culture en fonction de l'objectif de production (rendement espéré),

Détermination du reliquat d'azote à la sortie de l'hiver,

Prise en compte des autres sources d'azote.

- Étape 1

Les besoins en azote des cultures seront fonction de leur potentiel de rendement, de sorte à ne pas sur-fertiliser les cultures à faible potentiel (des cultures risquant de souffrir de manque d'eau) ou au contraire sous-fertiliser les cultures à haut potentiel (tableau 4). Afin d'atteindre cet objectif, l'agriculteur peut prendre comme objectif de rendement la moyenne des deux meilleurs rendements obtenus sur la parcelle au cours des cinq dernières années. Ou bien se base sur les rendements moyens observés dans la région pour des types de sols voisins. Une fois l'objectif fixé, il suffit de le multiplier par les besoins unitaires de la culture, c'est-à-dire la quantité d'azote prélevée par la culture au cours de sa croissance.

Exemple : Le blé tendre a besoin est de 3 kg d'azote par quintal de grain produit. Un objectif de rendement de 80 q correspond donc à des besoins de $80 \times 3 = 240$ kg d'azote/ha.

Tableau 4 : Besoins totaux en azote de Quelques cultures

Culture	Quantité d'azote (kg/q)
Blé tendre	3
Blé dur	3.5
Orge d'hiver	2.4
Mais	2.3
Colza	6.5
Tournesol	4.5

(Source : COMIFER. 2013)

La quantité d'azote appelée **reliquat d'azote minéral dans le sol à la fermeture du bilan (Rf)**, **représente** une certaine quantité d'azote qui n'a pas été utilisée par la culture ou que les racines n'ont

pas été capables d'extraire. Elle peut être estimée en fonction de la profondeur du sol ou en utilisant un coefficient multiplicateur donné par des tables. Elle doit être ajoutée aux besoins de la culture calculés précédemment.

- **Étape 2**

Le reliquat d'azote présent à la sortie de l'hiver (R_i), doit être pris en considération si on ne veut pas s'exposer à des risques de surfertilisation, qui peuvent provoquer notamment la verse des céréales. Pour déterminer cette quantité d'azote, on peut faire une analyse de terre à la sortie de l'hiver.

- **Étape 3**

Il faut ensuite évaluer les autres sources d'azote :

Provenant de l'épandage d'effluents d'élevage

Provenant de la minéralisation de l'azote organique du sol (humus, résidus végétaux...).

Il faut aussi tenir compte de la nature du précédent cultural dans le bilan azoté

Exemple :

Les résidus de récoltes de pois ou de betteraves sucrières, facilement fermentescibles, fournissent environ 20 kg par hectare, alors qu'à l'inverse des pailles de blé enfouies mobilisent momentanément 20 kg d'azote par hectare pour leur décomposition.

3.5.4. Les engrais azotés

L'ensemble des engrais minéraux azotés est préparé à partir de deux produits de base, synthétisés en usine : l'ammoniac et l'acide nitrique. Leur fabrication est très coûteuse en énergie et leur prix est élevé. Ils sont classés en plusieurs catégories selon la forme chimique de l'azote qu'ils contiennent (tableau 5).

Tableau 5 : Catégories d'engrais azotés et principaux engrais

Engrais	Teneur en N	Teneur en éléments secondaires	Remarques
Engrais nitriques			action rapide
– nitrate de soude NaNO_3	16 %	36,5 Na_2O	
– nitrate de chaux $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	15,5 %	34 CaO	
– nitrate de chaux et de magnésium	15 %	46% CaO et 8% MgO	
Engrais ammoniacaux			action progressive
– sulfate d'ammoniaque $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	21 %	61 % SO_3	acidifiant
– ammoniac anhydre NH_3	82 %		gaz liquéfié
Engrais ammoniacaux-nitriques			les plus utilisés
– ammonitrates NH_4NO_3 , différents dosages	27 % et 33,5 %		moitié NO_3^- , moitié NH_4^+
– sulfonitrate d'ammoniaque	25 à 28 %	20 à 35 % SO_3	éventuellement 8 % MgO
Engrais amidiques			→ NH_4^+ dans le sol
– urée (N uréique)	46 %		intéressant en sols
– cyanamide calcique (N cyanamidique)	18 à 21 %	60 à 70 % CaO	acides ou lourds

(Source : Deblay & Charonnat , 2006)

3.5.5. Fractionnement des apports

Pour être plus efficace, la dose totale d'azote à apporter doit être fractionnée en plusieurs apports, correspondant à des stades précis de développement. Ainsi, sur les céréales, on conseille en général un apport à la sortie de l'hiver et un apport au stade fin tallage-épi à 1 cm. Un troisième apport, au plus tard au stade apparition de la dernière feuille, contribue à augmenter la teneur en protéines des grains de blé.

3.6. Raisonnement de la fertilisation phospho-potassique

3.6.1. Le phosphore

a. Rôle agronomique du phosphore

Comme l'azote, le phosphore est considéré comme un facteur de croissance pour la plante ; son action est particulièrement importante dans les stades jeunes et principalement sur le développement du système racinaire. Cet élément est essentiel pour la floraison, la nouaison, la précocité, le grossissement des fruits et la maturation des graines. Le phosphore est aussi un facteur de précocité, opposé en cela à l'azote ; il raccourcit la durée du cycle végétatif et accélère la maturation. Il accroît la résistance au froid, aux maladies, au stress hydrique. La teneur des végétaux en P_2O_5 est de 0,5 à 1 % de la matière sèche.

b. Le phosphore dans le sol

Dans le sol, de grandes quantités de phosphore peuvent être présentes, mais en général, seulement une faible partie d'entre elles sont sous des formes assimilables par la plante. Les plantes prélèvent le phosphore dans la solution du sol sous forme d'ions H_2PO_4^- , accessoirement sous forme HPO_4^{2-} . La fourniture des ions phosphore doit être assurée à proximité immédiate des racines actives, compte tenu du fait que ces ions nutritifs sont relativement peu mobiles dans le sol.

c. Les engrais phosphatés

Les engrais phosphatés sont fabriqués à partir de phosphates naturels (mines) ou de sous-produits de la sidérurgie. Ils sont classés en fonction de leur solubilité (tableau 6). Le titre des engrais phosphatés est exprimé en leur teneur en équivalents de P_2O_5 qu'ils contiendraient. Pour passer de la teneur en P_2O_5 à celle en P, on divise par 2,3 (ou on multiplie par 0,44). Ces minerais, le plus souvent de l'apatite, contiennent le P sous la forme $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (phosphate tricalcique), sel insoluble dans l'eau et soluble seulement dans les acides forts. Des traitements industriels, mettant en œuvre, le plus souvent, les acides minéraux industriels (HCl , H_2SO_4 , HNO_3 et H_3PO_4) vont avoir pour objectif de rendre plus soluble la combinaison contenant le phosphore, en provoquant la formation de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, ou phosphate monocalcique, sel soluble dans l'eau, ou au moins de CaHPO_4 , phosphate bicalcique, soluble dans les acides faibles. Ainsi, la valeur d'un engrais phosphaté minéral sera fonction :

De son titre en phosphore, exprimé par sa teneur en P_2O_5 ;

De sa solubilité, donc de la forme sous laquelle le P est contenu dans l'engrais. On distingue, par ordre décroissant de solubilité :

- les **superphosphates** : engrais qui contiennent le P sous la forme soluble dans l'eau $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$; ils titrent entre 18 % P_2O_5 (super-simple) et 44 % P_2O_5 ; les phosphates monoammoniques (11-50-0) et diaimoniques (18-50-0) ;
- les **phosphates bicalciques**, contenant P sous la forme CaHPO_4 soluble dans les acides faibles ;

- les **phosphates tricalciques**, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ insolubles dans l'eau, peu solubles dans les acides faibles et solubles seulement dans les acides forts ;

De sa présentation physique (qualité des granules, leur calibre et résistance à la friabilité, engrais liquide, ...).

Tableau 6 : Principaux engrais phosphatés (des plus solubles aux moins solubles)

<p>Superphosphates de chaux – normal : 16 à 24 % de P_2O_5 (22 à 30 % de SO_3, 38 à 50 % de sulfate de calcium) – concentré : 25 à 37 % de P_2O_5 (12 à 22 % de SO_3, 21 à 37 % de sulfate de calcium) – triple : >38 % de P_2O_5 (2 à 12 % de SO_3, 3 à 20 % de sulfate de calcium) <i>pas d'action sur le pH</i></p>
<p>Phosphates d'ammonium monoammonique et diammonique engrais binaires : N et P, plusieurs teneurs (11-48-0, 10-51-0, 18-46-0, 18-50-0...)</p>
<p>Phosphate bicalcique 38 % de P_2O_5</p>
<p>Phosphal 30 à 35 % de P_2O_5 <i>à éviter en sols acides, usage limité aux sols basiques</i></p>
<p>Scories de déphosphoration ou scories Thomas > 12 % de P_2O_5, 45 à 50 % de CaO <i>action amendante, également riches en oligoéléments. Ce produit disparaît progressivement</i></p>
<p>Phosphates naturels de 25 à 33 % de P_2O_5, 30 à 55 % de CaO <i>à réserver aux sols acides</i></p>

(Source : Deblay & Charonnat, 2006)

3.6.2. Le potassium

a. Rôle agronomique du potassium

Le potassium entre environ pour 3 % dans la constitution de la matière sèche des plantes. Il est fortement prélevé par les plantes, car il est impliqué dans de nombreux processus physiologiques. Très mobile dans la plante, il migre des organes âgés vers les plus jeunes. Il intervient principalement dans la synthèse des hydrates de carbone, leur migration et leur stockage. Sur le plan agricole, c'est un facteur de résistance au stress hydrique, au froid, au gel, aux maladies cryptogamiques.

b. Le potassium dans le sol

Dans le sol, le potassium utilisable se trouve à des teneurs comprises entre 0,05 et 3,5 %, principalement sur les particules d'argile et d'humus, d'où il peut passer dans la solution du sol et servir de nutriment pour la plante. La capacité du sol à fournir du potassium aux plantes sur une grande période dépend fondamentalement de plusieurs facteurs, à savoir le taux de potassium contenu dans les minéraux primaires, de la quantité du potassium libérée par ces minéraux, du taux et du type d'argile. Ainsi les méthodes d'analyse auront pour objectif de déterminer les teneurs en K_2O échangeables, c'est-à-dire réellement disponibles pour les plantes.

c. Les engrais potassiques

Les principaux engrais potassiques sont fabriqués à partir de deux roches, la sylvinite et la kiesérite, extraites des mines de potasse et de magnésium. La richesse en potassium des engrais potassiques s'exprime par leur teneur en K_2O . On passe de la teneur en K_2O à celle en K par un coefficient de 1,2. La valeur d'un engrais potassique est fonction de sa teneur en potassium exprimée par son titre en K_2O et de l'ion accompagnant le potassium :

Le KCl ou chlorure de potassium, il renferme entre 60 et 40 % K_2O , celui-ci étant souvent accompagné de $NaCl$. Il est peu apprécié en agriculture puisque certaines plantes ne le supportent pas en plus, il contribue à accroître la salinité, à inhiber la germination et la croissance.

Le K_2SO_4 ou sulfate de potassium, il renferme 47% de K_2O . l'ion sulfate est plus apprécié, car utile à l'alimentation de la plante en soufre. Il est exigé en fortes quantités par certaines cultures il ne s'accumule pas de manière aussi importante dans le sol que le Cl^-

Le KNO_3 ou nitrate de potassium (12 % N, 42 % K_2O), il est apprécié pour l'azote (ion nitrate) qu'il contient sous forme directement assimilable.

3.6.3. Principes des fertilisations phosphatées et potassiques

Le raisonnement de la fertilisation repose sur quatre critères :

Les exigences de la culture,

La teneur du sol en P et en K (analyse de sol),

Le passé récent de fertilisation sur la parcelle,

Le devenir des résidus de la récolte précédente.

La prise en compte de ces critères permet d'effectuer le calcul des doses d'engrais à apporter.

a. Exigences des cultures

Les cultures sont plus ou moins exigeantes en P et en K :

Une espèce exigeante en un élément voit sa production pénalisée par une impasse de fumure ;

Une espèce peu exigeante voit sa production peu pénalisée par une impasse, des doses relativement faibles sont suffisantes pour lui assurer une alimentation correcte.

La betterave, par exemple, est exigeante en potassium car elle est très sensible à un apport irrégulier de cet élément. Le rendement peut être très affecté en cas d'impasse, même dans un sol bien pourvu. À l'inverse, une céréale est peu sensible à une impasse

Trois classes d'exigence ont été définies selon la réaction des plantes à une absence de fumure. Les cultures sont peu, moyennement ou très exigeantes (tableau 7).

Tableau 7 : Exigences en phosphore (P) et en potassium (K) de quelques cultures

Cultures	Exigences en phosphore
Betterave, colza, luzerne, pomme de terre, pois, oignon, carotte	Très exigeantes
Blé suivant blé, blé dur, maïs ensilage, orge, sorgho, féverole	Moyennement exigeantes
Avoine, blé tendre, maïs grain, seigle, soja, tournesol	Peu exigeantes
	Exigences en potassium
Betterave, pomme de terre, pois, oignon, carotte	Très exigeantes
Colza, luzerne, maïs, soja, tournesol, féverole	Moyennement exigeantes
Avoine, blé dur, blé tendre, blé suivant blé, orge, sorgho, seigle	Peu exigeantes

(Source : COMIFER, 2019)

b. Teneur du sol en P et en K

Une analyse du sol est indispensable pour déterminer les teneurs du sol en P et K. une fois obtenus, ils doivent être interprétés en fonction du type de sol de la région et de la classe d'exigence de la culture implantée. En effet, un sol « pauvre » pour une culture exigeante (betterave, colza...) peut être « riche » pour une culture peu exigeante (blé, orge...). Il est recommandé d'en réaliser une tous les 4-5 ans au même endroit et à la même saison.

Les teneurs mesurées dans l'analyse de terre sont comparées à deux valeurs seuils (figure 6) :

La teneur « impasse » **Timpasse** est la teneur (pour la culture considérée) au-delà de laquelle on peut faire une impasse de fertilisation, sauf dans le cas des cultures très exigeantes ;

La teneur « renforcement » **Trenforcé** est la teneur en-dessous de laquelle il faut renforcer la fumure au-delà de l'entretien, sauf pour les cultures peu exigeantes.

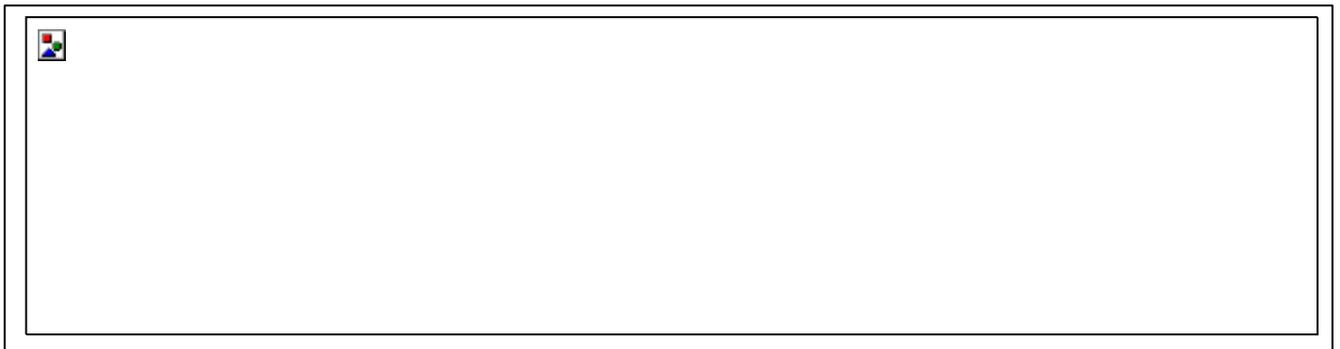


Figure 6 : Raisonnement de la fumure phosphatée et potassique à partir des valeurs seuils (Source : Chambre d'agriculture d'île de France, 2016)

Le raisonnement de la fumure tient compte de la classe d'exigence de la culture implantée (tableau 8). Ainsi, dans le cas de cultures très exigeantes, quelle que soit la teneur du sol en P ou en K, il n'y a pas de Timpasse puisque toute impasse est déconseillée. À l'opposé, dans le cas de cultures peu exigeantes, il n'y a pas de Trenforcé puisque l'enrichissement n'amène aucun profit à long terme. Un simple ajustement de la fertilisation aux besoins de la culture est conseillé (Annexe1).

Tableau 8 : les différents cas rencontrés après analyse du P et du K et les conseils de fertilisation correspondants.

Si la teneur mesurée à l'analyse est :	Inferieur à $T_{\text{renforcé}}$	Comprise entre $T_{\text{renforcé}}$ et T_{impasse}	Supérieur à T_{impasse}
Cultures exigeantes	Le rendement augmente avec des doses supérieures aux exportations : fumure renforcée	Fumure d'entretien	La culture réagit toujours aux apports d'engrais. Il n'y a pas de seuil « impasse » : fumure d'entretien
Cultures Moyennement exigeantes	Le rendement augmente avec des doses supérieures aux exportations : fumure renforcée	Fumure d'entretien	Le rendement n'augmente pas quand on apporte de l'engrais : impasse possible
Cultures peu exigeantes	La culture ne répond pas aux doses d'engrais supérieurs aux exportations.il n'y a pas de seuil « renforcement » : fumure d'entretien	Fumure d'entretien	Le rendement n'augmente pas quand on apporte de l'engrais : impasse possible

(Source : Deblay & Charonnat, 2006)

c. Passé récent de fertilisation

Dans le sol seule une partie de la fumure P et K est utilisée par les plantes. L'excédent reste dans le sol mais évolue plus ou moins rapidement selon le pouvoir fixateur du sol vers des formes chimiques peu disponibles. Pour évaluer la disponibilité des éléments fertilisants à l'échelle de la rotation, on utilise un indicateur basé sur le nombre d'années culturales successives sans apports. On distingue 2 situations :

Soit la parcelle est fertilisée régulièrement tous les ans, voire tous les 2 ans, et l'on considère que le passé de fertilisation est favorable ;

Soit aucun apport n'a été réalisé depuis plusieurs années et l'on considère que le passé de fertilisation est défavorable. Dans ce cas, la fertilisation doit être majorée.

Le plan de fumure tient donc compte de l'historique des apports (engrais minéraux et apports organiques) et il est déconseillé de faire plus de deux années successives d'impasse.

d. Résidus de récolte du précédent

Les résidus de la culture précédente une fois enfouis dans la terre, se dégradent et libèrent par conséquent les éléments minéraux qu'ils contiennent dans le sol, ce qui implique qu'ils doivent être également pris en compte. Selon la partie récoltée (graine, racine, tige), les résidus sont plus ou moins abondants et restituent plus ou moins d'éléments au sol. Les résidus sont généralement pauvres en phosphore et leur devenir n'intervient pas dans le calcul de la fumure phosphatée. En revanche, les tiges et les feuilles, restituent la plus grande part du potassium prélevé lors du cycle de végétation (80 à 90%), à condition d'être enfouies après la récolte. Un blé de 80 q peut restituer ainsi jusqu'à 250 kg de K_2O .

3.6.3.1. Calcul de la fertilisation

Elle se calcule en fonction du rendement prévu, de la teneur des exportations (grain et paille) et d'un coefficient multiplicateur calculé à partir d'une grille reprenant les éléments précédents (tableau 9 et 10). Cette grille varie selon les éléments minéraux considérés, le niveau d'exigence des cultures et de la richesse du sol.

Tableau 9 : Détermination des coefficients multiplicateurs pour le calcul des doses de P_2O_5 à apporter (kg/ha) suivant la teneur du sol.

P_2O_5	Nombre d'années sans apport	Teneur du sol						
		Teneur faible			Teneur élevée			
		T renf.	- 10%	T impasse	+ 10%	2x T imp.	3x T imp.	
Culture de forte exigence	0	2,2	1,5	1,2	1,0	8,0	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
Culture de moyenne exigence	0,0	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
Culture de faible exigence	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

(Source : Chambre d'agriculture d'île de France, 2016)

Tableau 10 : Détermination des coefficients multiplicateurs pour le calcul des doses de K_2O à apporter (kg/ha) suivant la teneur du sol

K_2O	Nombre d'années sans apport	Teneur faible → Teneur élevée						
		T renf.	- 10%	T impasse + 10%	2x T imp.	3x T imp.		
Culture de forte exigence	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
Culture de moyenne exigence	0,0	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
Culture de faible exigence	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	1,2	1,0	1,0	0	0

(Source : Chambre d'agriculture d'île de France, 2016)

Dans le cas où les sols sont bien pourvus, la fertilisation consistera en une **fumure d'entretien** du niveau de fertilité P ou K constaté. Il suffira alors de tenir compte des quantités exportées par les récoltes et perdues par les insolubilisations ou le lessivage, de les comparer aux restitutions, entre autres, contenues dans les matières organiques apportées au sol et d'en déduire, par différence, les quantités qui doivent être apportées par les engrais minéraux. Ces calculs peuvent être effectués pour chaque culture, et la fumure apportée au début de chaque saison culturale.

Dans le cas où le sol est pauvre dans l'élément considéré, une fumure de **redressement** devra être effectuée. Elle aura pour objectif d'accroître, de manière très progressive, les teneurs des sols en éléments déficients. Notons qu'il existe des situations dans lesquelles cet objectif ne peut être atteint et où seule une fertilisation apportant régulièrement des quantités faibles de l'élément sous une forme assimilable s'avère justifiée