

Fourniture du sol et besoins des cultures en engrais : la recherche d'un équilibre conciliant économie et protection de l'environnement

La Rédaction¹.

Analyse de terre

L'analyse de terre est le point de départ de la définition du besoin d'apports d'engrais. Il faut distinguer l'analyse de terre (couche de sol travaillée par l'agriculteur) de l'analyse de sol qui vise à caractériser la parcelle du point de vue pédologique selon les différents horizons². L'analyse de sol constitue un complément utile à l'analyse de terre.

Dans l'analyse de terre, trois types de paramètres sont analysés : physiques, chimiques et biologiques. Dans certains cas, l'analyse de terre est complétée par une analyse du végétal : diagnostic foliaire, indice de nutrition des prairies, etc. Une bonne analyse de terre suppose que trois conditions soient respectées :

1. la représentativité de l'échantillon, conforme au problème posé ;
2. la mise en œuvre de méthodes d'analyse normalisées, agréées (ministère de l'Agriculture) et, si possible, accréditées (COFRAC³) ;
3. un référentiel régionalisé.

Dans cette perspective, le GEMAS⁴, qui regroupe la majorité des laboratoires français a développé une charte qualité qui permet aux clients de savoir à tout moment de quelle manière sont réalisées les analyses.

L'objectif de l'analyse de terre est donc d'établir une interprétation pertinente permettant d'élaborer des plans de fertilisation adaptés à la parcelle ou à l'exploitation, sur plusieurs années, avec possibilité de mises à jour régulières. Les modalités de prélèvement des échantillons ont été codifiées dans la norme NF X31 100.

Pour les dosages de nitrates ou de biomasse microbienne, l'échantillon doit être maintenu à 4°C dès le prélèvement et ce de façon ininterrompue jusqu'à l'analyse. L'objectif est de bloquer l'activité biologique pour empêcher toute évolution de l'échantillon.

En laboratoire, les analyses de terre portent sur les aspects suivants :

- diagnostic de biodisponibilité ;
- analyses physiques : granulométrie, matière organique, caractéristiques hydriques des sols, stabilité structurale ;
- analyses chimiques : CEC⁵, pH, calcaire total, calcaire

actif, cations échangeables (K, Na, Ca, Mg), P extractible⁶, oligoéléments (Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo), azote (total, nitrique et ammoniacal), soufre (sulfate et soufre organique disponible), éléments traces métalliques totaux (ETM) ;

- analyses biologiques : rapport C/N qui renseigne sur le degré d'évolution de la matière organique du sol, biomasse microbienne (matière organique vivante), matière organique labile (MOL), matière organique stable (MOS).

Les analyses de terre sont utilisées pour établir les plans de fumure à la parcelle analysée, pour la rotation culturale prévue. On tient compte de la fertilité de la parcelle, de la culture à mettre en place et du rendement objectif. Le logiciel d'interprétation du laboratoire peut fournir des recommandations pour les apports d'amendement basique et d'engrais minéraux, en fonction de la gestion des résidus de cultures et des produits organiques disponibles (fumier, lisier, compost...).

L'analyse de la plante complète au besoin l'analyse de terre. Elle est largement utilisée pour les cultures pérennes, viticulture et arboriculture, et se développe pour les autres cultures.

Calcul de la fertilisation

La fertilisation avec les engrais minéraux ou organiques vient en complément de l'offre du sol. L'objectif du calcul de fertilisation est de prévoir le besoin des cultures et d'estimer les fournitures du sol à l'aide de l'analyse de terre ; les engrais doivent alors couvrir la différence. En distinguant les grandes cultures annuelles et les systèmes prairiaux, on calcule ainsi les apports souhaitables d'azote, de soufre, de phosphore et potassium, de magnésium, d'oligoéléments et d'amendements basiques (calciques).

Azote

Pour estimer la dose d'azote complémentaire à appliquer, le plus simple, selon Rémy et Hébert (1977), est de comparer les entrées et sorties à l'échelle parcellaire entre la fin de la période de lixiviation (janvier à février) et la récolte de la culture. C'est ce que l'on appelle le bilan azoté prévisionnel, qui est un bilan de masse (en kg d'azote minéral par ha). Toutefois, cette méthode s'avère difficile à appliquer dans certains cas, de sols peu profonds et caillouteux, de cultures pérennes et de prairies pâturées

1. Remerciements à Christine Le Souder (Arvalis, Boigneville, 91) pour son aide dans l'élaboration de ce texte.

2. A1 : horizon d'éluviation ; A-B : horizon de transition ; B : horizon d'accumulation ; C : horizon minéral proche de la roche mère.

3. Comité français d'accréditation. Cette accréditation est la seule à avoir une valeur juridique, opposable aux tiers.

4. Groupe d'études méthodologiques pour l'analyse de sol.

5. Capacité d'échange cationique.

6. Méthodes Dyer, Joret-Hébert et Olsen (voir article de J.-L. Julien, ce numéro).

ou non, dans lesquels on ne peut pas accéder à tous les postes du bilan. On passe alors à une équation dite d'efficacité, avec utilisation d'un CAU (Coefficient Apparent d'Utilisation de l'engrais).

La méthode du **bilan azoté prévisionnel** pour les **grandes cultures** consiste à prendre en compte les quantités d'azote minéral présentes dans le sol exploré par les racines de la culture entre l'ouverture du bilan (1er février dans le bassin parisien par exemple) et sa fermeture, aussitôt après la récolte. Le total d'azote minéral à apporter par les engrais s'écrit : $X = (Nf - Ne) - (Re + Mo) + Rf$, équation dans laquelle Nf-Ne correspond au besoin de la culture et Re + Mo à la fourniture du sol.

Re, reliquat d'azote minéral à l'ouverture du bilan, est mesuré en général au cours de l'hiver, à la parcelle (prélèvement de terre), à la fin de la période de lixiviation. Cette mesure n'est pas nécessaire dans le cas où les variations interannuelles du reliquat sont faibles où si l'on peut valablement s'appuyer sur des références voisines. La minéralisation nette des matières organiques du sol (Mo) s'estime entre les deux dates en additionnant les différentes composantes de Mo : minéralisation « basale » nette de l'humus (Mhb), minéralisation supplémentaire liée aux arrière-effets des apports organiques (Mha) et aux retournements de prairies (Mhp), minéralisation des résidus de la récolte précédente, des cultures intermédiaires, de la jachère (Mr). La minéralisation totale disponible dépend dans tous les cas de la durée et de la période de présence de la culture sur la parcelle, ce que l'on exprime par un paramètre cultural qui dépend des dates d'ouverture et de fermeture du bilan.

L'autre approche pour les grandes cultures, dans le cas où la détermination du terme Re ou l'individualisation des différentes sources d'azote est difficile, est celle de l'**équation d'efficacité de l'azote** avec utilisation du CAU : $Nf = No^8 + CAU \times X^9$. Cette approche, moins courante, utilisée principalement en Poitou-Charentes, en Lorraine, et dans le sud de la France, nécessite un calage régional précis que l'on peut acquérir par l'expérimentation. Elle repose sur l'estimation de la fourniture du sol quantifiée par des mesures d'azote absorbé par la culture sans apport d'engrais (No), qui nécessite des grilles prenant en compte le milieu (sol et climat), et le système de culture. Le CAU est modulé selon les cultures et les périodes d'apports de l'engrais, dans chaque région agricole.

Dans les **systèmes prairiaux**, qui occupent près de 50% de la SAU¹⁰ et servent de support à la production

animale (lait, viande), 4 sources d'azote sont possibles :

- la minéralisation de la matière organique du sol ;
- la fixation de l'azote atmosphérique par les légumineuses des prairies mixtes ;
- la minéralisation des restitutions d'azote organique par les déjections animales dans les prairies pâturées ;
- les engrais azotés, organiques ou minéraux.

Le reliquat d'azote minéral est faible dans les prairies exploitées exclusivement pour la fauche, mais plus important en prairie pâturée après un hiver peu pluvieux. Pour cette culture, on passe le plus souvent par l'équation d'efficacité pour estimer la dose d'azote nécessaire. La contribution directe des déjections animales dépend du nombre de jours de pâturage par hectare. La contribution des légumineuses suit le taux de trèfle au printemps, estimé de préférence en juin. Si ce taux est supérieur à 20%, il n'y a pas besoin d'apport d'azote minéral complémentaire. Si le taux est inférieur à 20%, on estime que la contribution totale des légumineuses à l'alimentation azotée de la prairie équivaut à la quantité d'azote fixée dans la biomasse récoltée du trèfle.

Soufre

Le **soufre** est absorbé dans les plantes sous forme d'ion sulfate (SO_4^{2-}), habituellement issu de la minéralisation des formes organiques présentes dans le sol. Le cycle de transformation du soufre dans le sol est très similaire à celui de l'azote. Toutefois, en raison de l'absence de méthode analytique utilisable en routine pour déterminer le soufre SO_4^{2-} biodisponible, on ne peut raisonner pour le soufre comme pour l'azote en s'appuyant sur un bilan complet. On s'appuie donc sur une évaluation du risque de déficience en soufre, fonction des risques de lixiviation et du type de sol.

En ce qui concerne les cultures annuelles, le risque de déficience en soufre est évalué en prenant en compte 3 critères :

- le risque de lixiviation du soufre-sulfate pendant la période de développement de la culture : la lixiviation dépend essentiellement de la pluviosité et le risque de déficience est d'autant plus grand que le sol est plus drainant (sols superficiels et caillouteux) ;
- la capacité des sols à se réchauffer rapidement en sortie d'hiver et à fournir rapidement du soufre par minéralisation ;
- le passé récent de fertilisation soufrée de la parcelle ;

7. Ne = quantité d'azote minéral absorbée par le peuplement végétal à l'ouverture du bilan.

Nf = quantité d'azote minéral absorbée par le peuplement végétal à la fermeture du bilan.

Re = quantité d'azote minéral du sol présente sur la profondeur z à l'ouverture du bilan.

Rf = quantité d'azote minéral du sol présente sur la profondeur z à la fermeture du bilan.

Mo = quantité d'azote minéralisée (minéralisation nette) de l'azote organique du sol, provenant des quatre sources principales (Mha, Mhb, Mhp et Mr).

8. Culture non fertilisée.

9. Quantité apportée par la fertilisation.

10. Superficie agricole utile.

constituent des sources de soufre : les engrais minéraux (sulfate), les amendements organiques (lisiers, fumiers, écumes, vinasses), certains produits phytosanitaires et les apports dus aux retombées atmosphériques (en forte diminution depuis 15 ans et concentrées autour des agglomérations industrialisées).

Les grandes cultures se répartissent en trois classes selon leurs besoins : 200 à 100 kg SO₃/ha (colza, choux, moutarde, ail, oignon, luzerne, trèfle, graminées fourragères), 100 à 50 kg SO₃/ha (céréales à paille, maïs, pomme de terre, betterave sucrière et fourragère) et 50 à 20 kg SO₃/ha (les autres). Toutefois, ces cultures n'expriment pas la même exigence vis-à-vis d'un engrais soufré. En effet, les cultures d'été ont leur cycle positionné au plus près de la minéralisation du sol et en bénéficient donc pleinement, à la différence des cultures d'hiver.

L'évaluation du risque d'une déficience en soufre s'appuie sur une grille par culture croisant type de sol, pluviosité hivernale et apports de soufre historiques dans la rotation. Pour les cultures de faible exigence comme le maïs, l'apport de soufre n'est en général pas nécessaire. Pour les cultures d'exigence moyenne comme par exemple les céréales à paille, l'apport de soufre est parfois nécessaire, selon la grille de risques, par une fertilisation soufrée minérale. Dans certains cas de risques faibles, le diagnostic peut être complété par l'observation visuelle (jaunissement), l'analyse du soufre biodisponible du sol (méthode Scott) et par l'analyse foliaire (moyen de diagnostic le plus sûr). Pour les cultures d'exigence forte comme le colza, l'apport de soufre, toujours nécessaire, doit être pratiqué au plus près des besoins de la culture.

Les plantes fourragères des **systèmes prairiaux** ont des besoins en soufre importants. Toutefois leur occupation du sol toute l'année permet d'une part de limiter les risques de lixiviation et d'autre part de mieux bénéficier du soufre issu de la minéralisation du sol.

Phosphore et potassium

Le phosphore et le potassium sont 2 éléments peu mobiles et plutôt fixés à la phase solide du sol à la différence de l'azote et du soufre. Le potassium est un peu plus mobile que le phosphore, sa dynamique dans le sol dépend essentiellement de la richesse et du type d'argiles. Le phosphore est très peu mobile et sa dynamique est surtout influencée par le pH et le taux de calcaire du sol.

Pour évaluer les besoins en engrais, on passe par une analyse de terre, qui permet d'estimer la disponibilité du sol en P ou K. Les apports dépendent :

- de l'exigence de la culture en P ou K (ou encore de la sen-

sibilité de la culture à une restriction de fumure) ;

- de la teneur en élément P ou K disponible à l'analyse de terre ;
- du passé récent de fertilisation
- de la gestion des résidus de récolte du précédent (pour le K).

En fonction de leur exigence en phosphore et en potassium, les **cultures annuelles** ont été classées en trois catégories :

- exigence élevée : en phosphore (betterave, colza, luzerne, pomme de terre), en potassium (betterave, pomme de terre)
- exigence moyenne : en phosphore (blé dur, blé sur blé, maïs ensilage, orge, pois, RGI¹¹, sorgho), en potassium (colza, luzerne, maïs ensilage et grain, pois, RGI, soja, tournesol) ;
- exigence faible : en phosphore (avoine, blé tendre, maïs grain, soja, tournesol), en potassium (avoine, blé dur, blé tendre, orge, sorgho).

L'analyse de terre fournit une indication de la quantité d'élément extractible par les plantes, assimilable pour le phosphore, échangeable dans le cas du potassium. Les différentes méthodes d'analyse du phosphore¹² et du potassium¹³ rendent compte de l'histoire de fertilisation de la parcelle (succession de cultures, apports minéraux, apports organiques) ainsi que de l'aptitude du sol à retenir ou libérer l'élément sous l'action de la plante. Pour plus de précision, l'analyse de terre doit donc être faite à chaque parcelle agricole.

Cette démarche, à l'aide des 4 critères, permet de répartir la biodisponibilité de la parcelle en trois classes : faible (fumure renforcée nécessaire, au-delà de l'entretien), moyenne (fumure d'entretien de l'ordre des exportations) et forte (dose nulle ou impasse).

En **système prairial**, l'analyse de terre pose des problèmes d'interprétation (fort gradient de teneurs en surface, abondance de matière racinaire). Un diagnostic plus fiable est apporté par l'analyse de plante. Les teneurs de l'herbe en P et K sont strictement dépendantes de sa teneur en azote, pour une biodisponibilité donnée de P et K dans le sol. Le diagnostic se fait par mesure de l'écart au comportement normal, à partir d'abaques ou par calcul d'indices de nutrition. Si ceux-ci restent satisfaisants sur la bande azote, cela signifie que l'offre de P et K est suffisante

Magnésium

Le magnésium est également indispensable à la nutrition des cultures. Il est essentiel pour l'assimilation

11. Ray Grass Italien.

12. Méthode Dyer-Demolon dans les sols acides, méthodes Joret-Jobert ou Olsen dans les sols neutres et calcaires. Dans les andosols (Massif central par exemple), aucune de ces trois méthodes ne convient.

13. Extraction par l'acétate d'ammonium normal, qui convient pour l'ensemble des sols français.

du gaz carbonique par la photosynthèse. Sa dynamique dans le sol se rapproche de celle du potassium. La décision d'un apport de magnésium repose sur principalement 2 critères :

- la teneur en MgO échangeable du sol, à l'analyse de terre, interprétée en fonction du type de sol ;
- le besoin ou plutôt l'exigence en Mg des cultures.

Oligoéléments

Quantitativement, les besoins des plantes en oligoéléments¹⁴ sont faibles, la grande majorité des sols peut assurer une alimentation non limitante. Il existe parfois des carences vraies en éléments (comme le cuivre en sol très squelettique) qu'il faut corriger. Mais les principales carences sont des carences induites : l'élément est présent dans le sol, mais un facteur ou une condition d'alimentation liée au sol « bloque » son absorption par la plante. Citons par exemple un sol excessivement riche en matière organique (marais) ou ayant subi un chaulage trop important. Il existe des indicateurs à l'analyse de terre ainsi qu'à l'analyse de plante. Les apports en oligoéléments sont donc à apporter au cas par cas, sans apports systématiques.

Dans le cas des systèmes prairiaux, les carences sont peu fréquentes. En cas de faible teneur dans le fourrage, des apports d'enrichissement pourraient être faits, mais en général ils sont moins rentables que des compléments directs dans la ration des animaux.

Amendements basiques

L'acidification des terres est un phénomène naturel sous nos climats qui entraîne, à faible vitesse, une diminution du pH des sols non calcaires. Un abaissement trop important du pH entraîne des risques de toxicité principalement en aluminium (également en manganèse). Dans certains types de sol, les propriétés structurales peuvent aussi être affectées.

L'apport d'amendements basiques (ou chaulage) permet d'augmenter le pH des sols, par l'apport de bases, sous forme de carbonates de calcium et de magnésium (calcaire, dolomie, chaux vive...). Pour les cultures annuelles, la stratégie d'apport réside dans la comparaison du pH mesuré à un pH minimum, de l'ordre de pH=6 pour la plupart des cultures, et le déclenchement d'un chaulage de correction pour remonter le pH en cas de franchissement du seuil. Un chaulage annuel d'entretien prend ensuite le relai.

La mesure du taux de saturation de la CEC (capacité d'échange cationique) peut parfois remplacer la mesure du pH. La mesure de la CEC peut permettre de préciser la dose d'amendement nécessaire à la correction (CEC) et le taux de saturation de la CEC (variable selon le niveau du pH_{eau}).

Dans les systèmes prairiaux, l'apport d'amendements basiques se raisonne de la même façon qu'en grandes cultures, surtout pour un objectif de qualité de la prairie (espèces présentes). Dans ce cas, l'exigence de niveau de pH est plutôt proche de pH=5.5.

14. Fe et Mn, Cu et Zn, B et Mo.