Un labo wallon de pédologie parmi d'autres...

Interpréter l'analyse de terre pour la culture maraîchère : comprendre les résultats (3/3)

Laurent Dombret, Biowallonie

Nous avons vu, dans les *Itinéraires BIO* n°61 et n°62, les façons d'exprimer vos résultats d'analyse ainsi que la compréhension du conseil de fertilisation azotée. Ce troisième volet décrit enfin comment interpréter les résultats d'analyse au regard des optimums[1] de référence, définis au sein du réseau Réquasud. Le conseil de fertilisation P, K, Mg est également abordé, fragmentairement car les laboratoires conservent le secret du cheminement exact depuis les valeurs analytiques.

ERRATUM : le volet 2/3 publié dans *Itinéraires BIO* n°62 au format papier n'a malencontreusement pas été repris dans sa dernière version corrigée. La version PDF d'*Itinéraires BIO* n°62 est cependant mise à jour sur *biowallonie.be*.

Analyse granulométrique et taux d'argile

Soit la détermination du pourcentage massique d'argile granulométrique (particules < 2 µm), de limon (2–50 µm) et de sable (> 50 µm). Assez coûteuse, cette analyse ne se fait pas en routine.

Cependant, plusieurs laboratoires Réquasud proposent désormais en routine – par spectrométrie dans l'infrarouge (NIR) – la prédiction/approximation du taux d'argile (et d'ailleurs aussi la C.E.C., le taux de carbone organique et d'azote total).

TAUX D'ARGILE masse/masse	Type de sol selon taux d'argile	Correspondance carte des sols
< 9 %	Sableux	Z
[9 à 13 %[	Sable limoneux (sablolimoneux)	S, P, L
[13 à 16 %[	Limon léger/sableux à moyen	L, A
[16 à 30 %[	Limon moyen à lourd	A
[30 à 37 %[	Argileux	E
≥ 37 %	Argileux lourd	U

Figure 17 : Dénomination de texture selon le taux d'argile approximatif[2]

On parlera de **sol à comportement argileux à partir de 30–35 % d'argile**, limons et sable étant alors entièrement « noyés »[3] dans la masse argileuse.

Optimums de référence

Le taux d'argile est totalement déterminant de beaucoup d'autres valeurs analytiques.

La granulométrie optimale en maraîchage diversifié va du sable limoneux au limon lourd, et sans charge caillouteuse. Le limon léger présente un comportement moyen généralement idéal : bien drainant tout en retenant suffisamment l'eau et les nutriments, aisé à travailler mécaniquement.

La battance est le phénomène par lequel les mouvements de fines particules de sol peuvent venir colmater la macroporosité de la partie superficielle du sol, amplifiant le ruissellement, l'érosion et l'assèchement du sol par la nouvelle capillarité constituée. Quand l'analyse granulométrique complète est demandée, son résultat rend possible **le calcul[4] d'un indice de battance (IB), valable en sol à pH_{eau} <7 :**

$$IB = \frac{(1{,}5\ x\ \%limonfin) + (0{,}75\ x\ \%limongrossier)}{\%argile + (10\ x\ \%M.O)}$$

IB	Appréciation
> 2	Très battant
2 > IB > 1,8	Battant
1,8 > IB > 1,6	Assez battant
1,6 > IB > 1,4	Peu battant
IB < 1,4	Non battant

Figure 18 : Sensibilité de la surface du sol à la battance

Conseil de fertilisation

La granulométrie est une donnée fixe que ne peut pas modifier le producteur, qui doit s'en accommoder. Ses leviers d'action seront plutôt le pH, le taux de matières organiques, l'adaptation du travail mécanique du sol ou encore le fractionnement des apports/arrosages en cas de sol léger.

[1] Les optimums proposés sont liés aux méthodes d'analyse de ce réseau de laboratoires.
[2] SCO – JMP – LMB (Labo Ath)
[3] Baize D., p. 82.
[4] Équation de l'INRAE Laon (Nord de la France), utilisée par divers laboratoires Réquasud.

Capacité d'échange cationique

OK, on vous a déjà perdus ! Non ? Alors, c'est parti. La Capacité d'Échange cationique (C.E.C.) d'un sol est la quantité maximale de cations **Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Na^+, H^+, Al^{3+}** qu'un sol peut retenir de façon labile/électrostatique. Elle est la somme des sites d'échange négatifs à la surface des innombrables microagrégats floculés qu'on appelle complexe argilohumique (C.A.H.). Elle détermine la capacité du sol à retenir ou libérer de façon inversible les cations fixés, offrant un réservoir tampon de nutriments (mais aussi d'acidité) mis en solution progressivement pour les cultures. Elle est donc utilisée comme **mesure de la fertilité d'un sol**. La C.E.C. fournit par ailleurs une **bonne corrélation avec les propriétés de rétention en eau du sol.**

La proportion de Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Na^+ dans la C.E.C. s'appelle quant à elle le « **taux de saturation** », et celle de H^+, Al^{3+} dans la C.E.C. s'appelle l'« acidité d'échange ». Un taux de saturation de 100 % est réputé très élevé (le réservoir à nutriments est entièrement rempli...), un taux de saturation de 40 % est considéré comme très bas, l'acidité d'échange occupant la majorité de la C.E.C.

La C.E.C. est directement **fonction du taux d'argile et du taux de matière organique humifiée**. La C.E.C. de l'humus étant nettement plus élevée en moyenne que celle de l'argile, chaque centième de matière organique en plus a une influence prépondérante sur l'élévation de la C.E.C. Pour preuve, une façon de déterminer empiriquement la C.E.C. est de faire le calcul[5] suivant, valable en sol limoneux : C.E.C. = (%argile x 0,37) + (%carbone x 2,73).

Dans votre analyse de sol, les valeurs seuils appliquées et optimums en Ca, Mg, K sont fonction de la C.E.C., dont la connaissance est fondamentale pour juger du niveau de réserves en cations.

Optimums de référence

Typiquement, les sols agricoles de la région wallonne[6] ont une C.E.C. comprise entre 8 et 15 cmol⁺/kg (cmol⁺/kg = méq/100 g).

Une C.E.C. sous 8 cmol⁺/kg va caractériser un sol sableux pauvre en matières organiques. Une C.E.C. au dessus de 20 cmol⁺/kg va caractériser un sol argileux (et/ou très humifère).

Une C.E.C. faible ne permet pas au sol de stocker efficacement les apports de nutriments faits au sol. Il faut donc les fractionner davantage dans ce cas.

Une C.E.C. élevée ne pose pas de réel problème, mais en cas de sol acidifié, la correction de pH est plus lente (cf. statut acidobasique).

Le conseil de fertilisation

Si la C.E.C. est faible, le conseil de fumure passera par l'ajout de la matières organiques aptes à augmenter le stock d'humus, soit riches en tissus lignocellulosiques.

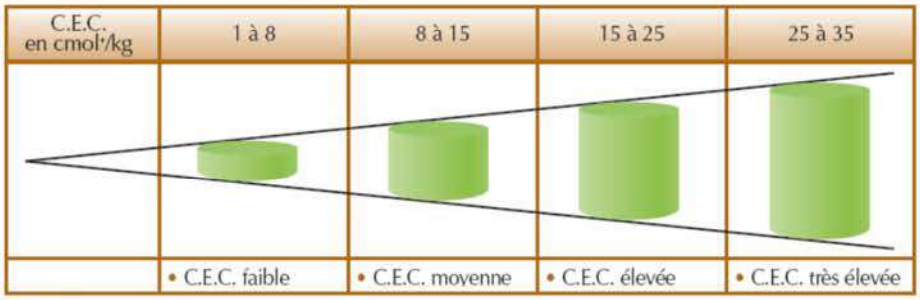


Figure 19

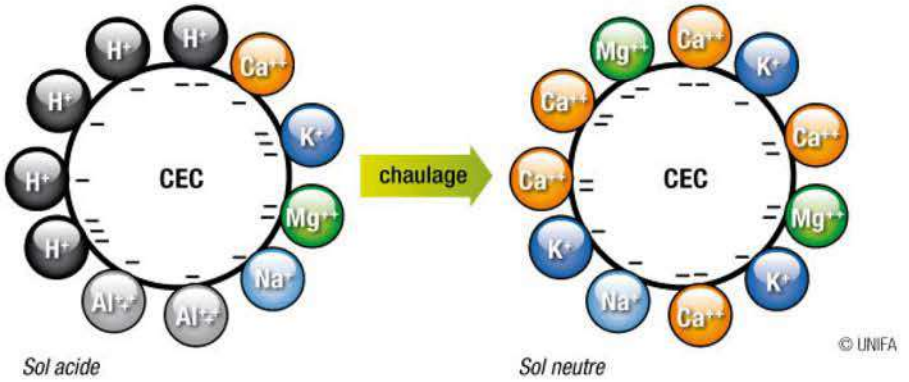
Statut acidobasique

La neutralité acidobasique est définie à pH 7, qui représente la teneur en H^+ de l'eau totalement pure.

Dans le sol, les ions H^+ sont en équilibre avec ceux à l'état non dissocié, échangeables sur le C.A.H. **Le pouvoir tampon du sol aux variations de pH est d'autant plus fort que sa C.E.C est élevée.** Ce pouvoir tampon a une importance pour par exemple faire passer le pH du sol de 6 à 7 par apports d'amendements basiques.

Le pH_{eau} est le pH d'une suspension de terre fine dans de l'eau déminéralisée. Il exprime une concentration actuelle de H^+ dans la solution de sol.

Le pH_{KCl} est, quant à lui, celui obtenu dans une solution de KCl. L'ion K^+ amené en grande quantité vient déplacer la quasi-totalité des cations adsorbés sur le C.A.H, notamment les H^+, vers la solution où le pH est mesuré. Il mesure l'acidité « potentielle » d'un sol et est inférieur de 0,5 à 1,5 unités au pH_{eau}.



En sol cultivé et non calcaire, sans contre-mesures, l'acidification est un processus inévitable, qui résulte du remplacement progressif des cations, en particulier de l'ion Ca^{2+} par l'ion H^+. Les causes sont plurielles, dont l'exportation des cations des récoltes et le lessivage de ces cations hors du profil cultivé. À noter que l'acidité du sol fluctue avec la saison : elle a tendance à diminuer de quelques dixièmes d'unités de pH en hiver[7] (dilution des H^+ sous l'effet des pluies) et à augmenter en été, sous l'effet des acides organiques produits par l'activité biologique du sol, maximale à cette période.

Le pH influence la disponibilité des principaux éléments fertilisants et des oligoéléments. Pour les terres de culture, l'optimum de croissance végétale est généralement rencontré pour une gamme de pH_{KCl} comprise entre 6,0 et 7,0[8].

[5] SCO – JMP – LMB. [6] Mariage C. [7] Baize D., p. 120.
[8] Cf. site Web https://requasol.requasud.be/requasol_element/display/phkcl (consulté le 31/03/2021).

Aux valeurs de pH_{KCl} supérieures à 7,0, divers éléments majeurs ou oligoéléments deviennent peu disponibles aux racines, le sol se carence. **C'est le cas en particulier du phosphate, du magnésium et de divers oligoéléments** (fer, manganèse, bore, zinc et cuivre). Par contre, la disponibilité du molybdène augmente.

Une acidification du sol sous pH_{KCl} 5,0 s'accompagne d'une augmentation notable de la solubilité du manganèse et de l'aluminium, ce qui peut entraîner dans les sols détrempés l'apparition de symptômes de toxicité chez les espèces sensibles comme les laitues[9]. **Le phosphate n'est plus disponible à la culture, et la vie microbienne de minéralisation de la matière organique ralentit fortement.**

Le pH_{KCl} est le pH en routine du réseau Réquasud, réputé moins variable selon les conditions pédoclimatiques de prélèvements.

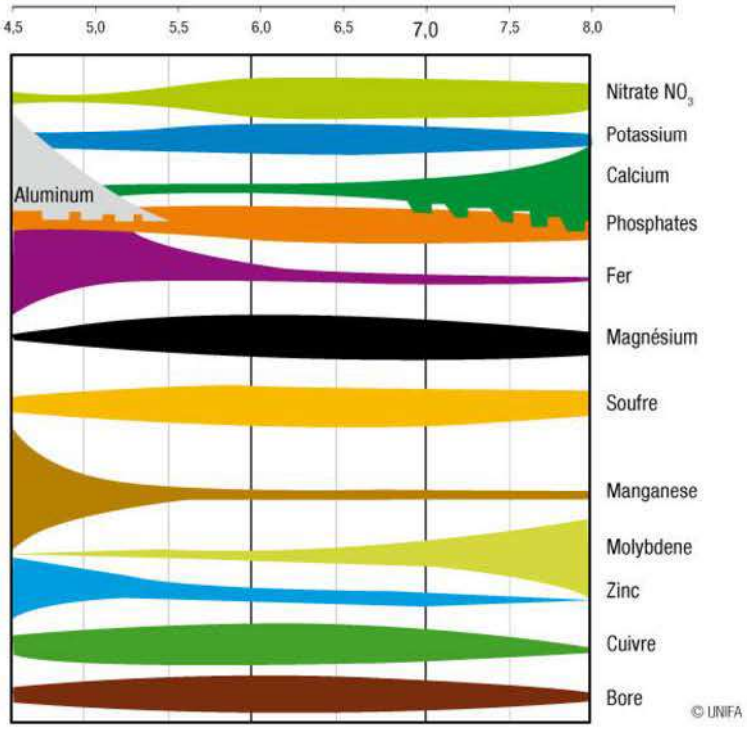


Figure 20 : Assimilabilité des nutriments par les végétaux en fonction du pH_{eau} du sol

Optimums de référence

pH_{KCL}	Qualification du sol	Interprétation
< 4,5	Très acide	À corriger
[4,5 à 5,3[	Acide	À corriger
[5,3 à 6,2[	Légèrement acide	À surveiller
[6,2 à 6,8[	Neutre	Correct
[6,8 à 7,2[	Légèrement basique	Élevé
≥ 7,2	Basique	Élevé

Figure 21 : Interprétation du pH_{KCl} des terres de culture[10]

L'optimum en maraichage est à pH_{KCl} de 6,5. Par contre, pour info, les prairies permanentes ont un pH_{KCl} optimum plus bas, de 5,5 à 6,0[11]. En effet, les plantes prairiales couvrent le sol en permanence et ont donc une activité racinaire acidifiante durant la majeure partie de l'année, entraînant une plus grande acidité du milieu. Les graminées prairiales sont par ailleurs adaptées à ce pH bas. Ce pH, au besoin, est d'ailleurs plus lent à remonter par chaulage qu'en terre de culture, en relation avec le taux de matière organique plus élevé, qui crée un pouvoir tampon plus important.

Le conseil de fertilisation

Qu'elle qu'en soit la nature, un amendement basique (comme l'ion carbonate) a pour objectif principal de neutraliser les ions H^+ présents dans le sol. Bien souvent, l'apport d'engrais de ferme et autres matières organiques assurent un chaulage d'entretien suffisant pour compenser les pertes annuelles en éléments basiques par lessivage/exportation (de l'ordre de 150 à 300 kg CaO / ha.an) et stabiliser le pH.

Il est conseillé d'opérer un redressement du pH par « chaulage de redressement », plus soutenu, dès lors que le pH_{KCl} est inférieur à 5,5. Si le pH_{eau} devait passer sous le seuil critique de 5,6[12], l'apport basique doit être très soluble pour une remontée rapide de pH évitant la toxicité aluminique/métaux lourds et de potentielles graves conséquences de rendement.

En général, quand la correction de pH à réaliser n'est pas trop importante, un seul chaulage tous les quatre ans suffit. Quand un apport plus conséquent est demandé, afin de pas augmenter trop vite le pH et conduire à des blocages de nutriments, l'apport est soit fractionné avec des apports annuels rapidement solubilisés, soit apporté en une fois sous une granulométrie plus grossière et ainsi plus lente à se dissoudre, par exemple autour de 4 mm. Pour rappel, **une remontée de pH trop rapide peut compromettre la disponibilité du phosphate, fer, manganèse, bore, zinc et cuivre.**

Par ailleurs, le chaulage avec des produits calciques favorise l'agrégation entre les particules d'argile et d'humus, ce qui **réduit la tendance à la battance**. Le calcium (ou le fer, sur sol décalcifié), assure en effet la liaison au sein du C.A.H. Le calcium donne des liaisons solides et très stables, qui empêchent une minéralisation trop rapide de la matière organique humifiée et qui s'oppose à la dispersion des argiles (colmatage et compaction du sol). **Dans les sols « colmatés/ refermés », le chaulage vise premièrement à une amélioration de la structure, facilitant ainsi les échanges gazeux et hydriques, le développement racinaire et la relance de l'activité microbienne de minéralisation.**

L'amendement basique s'épand **idéalement à l'automne**, avant l'implantation d'engrais verts d'automne. Et au minimum deux semaines avant un apport organique, pour éviter toute production et perte d'azote sous forme ammoniacale.

[9] Neuweiler R., p. 19. [10] Genot V. *et al.*, 2007, p. 14. [11] Genot V. *et al.*, 2007, p. 17.
[12] Issu de https://www.arvalis-infos.fr/chaulage-adapter-les-apports-d-amendements-aux-objectifs-@/view-5878-arvarticle.html

Types d'amendements basiques en bio

La capacité potentielle des amendements basiques à neutraliser l'acidité du sol et à infléchir le pH est mesuré par leur **« valeur neutralisante »**. Par convention historique : 1 unité en valeur neutralisante (VN) = 1 kg de CaO (chaux vive, corrosive).

Ainsi, si une roche carbonatée vaut 35 unités VN, cela veut dire que 35 kg de CaO ont la même action neutralisante que 100 kg de cette roche. Si le conseil de « chaulage » propose 500 kg CaO/ha, il faudra épandre 500 x 100/35, soit 1.428 kg/ha de cette roche. Il faudra néanmoins également connaître le délai de neutralisation de l'acidité (rapidité d'action), qui varie selon le produit utilisé et selon l'acidité initiale du sol, afin de vérifier que l'objectif de remontée de pH peut être atteint dans un délai qui vous convient.

En bio, les produits employés sont essentiellement des roches et d'autres produits « crus » à base de carbonates de calcium et/ou de magnésium[13]. Ces derniers peuvent être classés comme pulvérulents, broyés (min. 80 % du produit < 4 mm) ou concassés (min. 20 % du produit > 4 mm – uniquement en chaulage d'entretien). Ils diffèrent par leur vitesse d'action (vitesse de dissolution du carbonate, exprimée par la « solubilité carbonique » "SC"), qui dépend de leur finesse de mouture et de la dureté/tendreté du carbonate. Si SC < 20, la dissolution est lente ; si SC > 50, le produit est rapidement dissous.

Entre un calcaire pur (>95 % calcite $CaCO_3$) et une dolomie pure (>90 % dolomie $CaMg(CO_3)_2$), il existe tout un panel de roches plus ou moins riches en dolomie, et donc en magnésium. La dolomie étant plus alcalinisante que le calcaire, on pourra en épandre moins. Même si largement disponible, le lithothamne (algue calcaire) semble par contre plutôt à essayer d'éviter, détruisant ce biotope marin rare qu'est le maërl.

Les apports de sulfates de potassium, de magnésium ou de calcium sont considérés comme sans influence sur le pH.

Les engrais minéraux azotés – interdits en bio – (sulfate d'ammonium !, urée, nitrate d'ammonium, etc.) sont fort acidifiants, sauf la cyanamide calcique qui est très alcalinisante et elle-même, bien entendu, interdite en bio.

Besoins en chaulage

Le calcul exact du besoin en amendement basique dépasse le cadre de cet article. Retenons cependant les informations suivantes.

La remontée de pH n'est pas une fonction linéaire de l'apport en carbonates. Par exemple, pour passer de pH 5 à 5,5, il faut nettement moins de carbonates que pour passer de pH 5,5 à 6. À mêmes apports annuels en amendement basique, la remontée de pH est ainsi annuellement de moins en moins importante…

Par ailleurs, comme on peut le voir en figure 23, **au plus la teneur en argile du sol augmente, au plus l'apport doit être important pour un même objectif de remontée de pH** et de resaturation de la C.E.C. Par contre, au plus le taux d'humus est élevé, au plus les apports peuvent diminuer, jusqu'à être nuls au-delà de 10 % d'humus[15].

Pour sa « chaux crayeuse » concassée utilisable en A.B. et issue d'une carrière française (en réalité une roche calcaire crayeuse) et de VN min. 53 %, un fournisseur wallon conseille, en sol lourd, maximum 4 tonnes de produit/ha, pour une remontée d'une unité pH dans l'année. Et moitié moins pour une remontée de 0,5 unité pH. En sol léger, la dose à apporter pour un même effet sera nettement moindre.

	Teneur en CaO (%)	Teneur en MgO (%)	V.N. (%)	Vitesse de solubilisation
Calcaire + crayeux (=coccolithes) + marneux (5 à 35 % d'argile) + magnésien (5 à 10 % dolomie)	20 à 55	5 à 20	35 à 55	1 à 4 ans selon granulométrie
Calcaire dolomitique (10 à 50 % dolomie)	22 à 40	20 à 25	50 à 60	1 à 4 ans selon granulométrie
Écume de sucrerie	26	1	+/- 25 (Min. 20)	Rapide

Figure 22 : Caractérisation d'amendements basiques utilisables en maraîchage bio (sources diverses)

pH_{eau} du sol	Teneur en argile	Besoin en chaulage – kg CaO / ha
< 5,3	< 10 %	2.000
	10-30 %	3.000
	> 30 %	3.500
5,3 – 5,8	< 10 %	1.500
	10-30 %	2.500
	> 30 %	3.000
5,9 – 6,2	< 10 %	1.000
	10-30 %	2.000
	> 30 %	2.500
> 6,2	< 10 %	0
	10-30 %	0
	> 30 %	0

Figure 23 : Appréciation grossière de la dose d'amendement basique pour un chaulage de redressement en terre de culture[16]

[14] Flisch R. *et al.*, p. 25. [15] Flisch R. *et al.*, p. 25. [16] Sinaj S. *et al.*, p. 44.

Carbone et azote organique

Dans un échantillon de sol non calcaire (pas de carbone sous forme de carbonates), tout le carbone élémentaire se trouve sous forme organique. Le réseau Réquasud dose ainsi le **« carbone organique total » (C.O.T.)**, qui, multiplié par 2 (teneur approximative en carbone de la matière organique du sol), donne une idée du taux de matières organiques/humus dans 100 g de terre sèche. Veillez bien à enlever les racines vivantes de votre échantillon, car il s'agit de doser uniquement la matière organique disponible à la minéralisation.

En vérité, c'est la fraction la plus fine de la matière organique du sol, entre 0 et 50 µm, qui constitue l'humus proprement dit[17], stable et associé aux minéraux argileux essentiellement. Les fractions plus grossières sont constituées de matières « plus fraîches », davantage labiles et en cours de transformation dans le sol. La quantification de la biomasse microbienne vivante, qui représente 0,5 à 4 % du C.O.T. de l'échantillon, est un bon indicateur de qualité biologique du sol. La biomasse microbienne est plus élevée pour les textures les plus fines. Pour un type de sol donné, il existe par ailleurs une bonne corrélation entre la taille de la biomasse microbienne et la fourniture potentielle annuelle d'azote par le sol. Elle ne se pratique pas en routine.

Le taux de carbone organique des sols cultivés serait en relation avec le relief général de la Wallonie. Un climat froid et humide est *a priori* moins favorable à une décomposition rapide de la matière organique. Par ailleurs, à autres facteurs égaux, le stockage de carbone dans le sol serait fonction de la pluviométrie. En années sèches, davantage de carbone s'accumule, mais cet effet s'inverse lors d'années humides, où la décomposition du carbone s'accélère[18].

Optimums de référence

En terre de culture, un taux de carbone organique total de 1,1 % est considéré le seuil minimum à respecter pour une terre de fertilité minimale. Comme présenté dans le n°61 d'*Itinéraires BIO*, en figure 8 (valeurs moyennes d'analyse, par région agricole), nous observons que les sols maraîchers sont souvent plus riches en carbone organique que les optimums de référence présentés en figure 24.

La teneur en **azote total du sol (N_{tot})** est, elle aussi, sensiblement égale à la teneur en azote organique, puisque celui-ci représente plus de 95 % de l'azote total dans la plupart des sols.

C.O.T. (g/100g TSF)	1,1	1,2	1,6	2	2,4	2,7	4	6 et +
Sol sableux	Faible	Satisfaisant			Élevé		Trop élevé	
Sol limoneux	Faible	Satisfaisant			Élevé		Trop élevé	
Sol argileux	Faible	Satisfaisant			Élevé		Trop élevé	

Figure 24 : Interprétation de la teneur en carbone organique en terre de culture (sol non carbonaté)[19]

L'azote minéral est essentiellement présent sous NO_3^- et NH_4^+.

Nous n'avons pas trouvé de référence commune d'interprétation Réquasud de la teneur en azote total. Seul le C/N est évalué. Attention que la pratique de Réquasud est souvent d'exprimer la teneur en azote total en g/kg ou ‰, au lieu de g/100 g.

Un rapport C.O.T./N_{tot} (N exprimé en %) compris entre 8 et 12 est généralement garant d'un sol sain où la vie microbienne est active et dans lequel les matières organiques sont bien décomposées. Un rapport C/N inférieur à 8 indique une minéralisation trop rapide des matières organiques alors qu'un **C/N supérieur à 12 est l'indication d'une mauvaise minéralisation (conditions d'anaérobie, acidité excessive)** de celles-ci qui ont alors tendance à s'accumuler dans le sol.

Le conseil de fertilisation

Il est conseillé d'amener de la matière organique au moins tous les 2-3 ans en extérieur, et tous les ans sous abri, car les hautes températures rendent la minéralisation plus intense. La matière organique stable peut s'épandre à l'automne, la matière organique fraîche[20] s'épand et s'incorpore de préférence au printemps, mais au moins quatre semaines avant la culture.

Si l'analyse montre un taux faible de C.O.T., les apports de M.O sont trop bas et/ou la minéralisation des matières organiques du sol est trop intense. Il convient d'encourager le stockage de carbone avec des amendements stables et riches en tissus lignocellulosiques. Si, au contraire, le taux de C.O.T. est élevé **et** si la croissance végétale est mitigée, il convient d'apporter de préférence des matières organiques fraîches riches en azote (engrais verts, etc.)

La destruction de vieilles prairies, ayant par ailleurs stocké beaucoup d'humus stable, conduit à la décomposition rapide des racines et des feuilles et à une libération impressionnante d'azote minéral. Ce pool de nutriments augmente de façon intense l'agressivité microbienne globale et conduit en quelques années à l'épuisement de ce stock d'humus accumulé sur des temps longs, si l'on n'y prend pas garde. N'attendez donc pas trop avant de recommencer à apporter de la matière organique. Veillez néanmoins à vous tenir bien au courant de la législation wallonne concernant la destruction des prairies permanentes et les règles en vigueur durant les deux années suivantes.

En sol sableux, naturellement poreux, mais n'ayant pas une capacité importante de rétention de l'eau et des nutriments, appuyez davantage les composts plus mûrs et riches en matières organiques stables. Sur sol limonoargileux et argileux, la C.E.C. et la réserve utile en eau sont élevées, mais le sol a tendance à se « refermer » : les matières organiques plus fraîches conviennent mieux pour augmenter l'agrégation des particules et l'aération du sol, au moins temporairement.

Dans une logique de fertilisation des cultures sur le long terme, il est important de comprendre que même les matières organiques stables, ou à C/N élevé, finiront tôt à ou tard par minéraliser. Par accumulation progressive d'années en années, la minéralisation annuelle nette d'azote de cette manne organique surpasse à un moment donné les faims d'azote locales suscitées par les épandages de matières fraîches à C/N élevé. Cela mettrait de 3 à 5 ans pour obtenir une disponibilité suffisante d'azote pour les cultures malgré des apports régulièrement très carbonés.

Bon à savoir

En moyenne, en fumure de fond pour le maraîchage, **l'équilibre N-P-K de l'engrais/amendement organique à apporter est idéalement un multiple de 3-1-4, correspondant à ce qui est exporté par les cultures**[21]. Un engrais plus riche/plus pauvre en phosphore ou potassium peut être choisi en cas de teneur limite révélée par l'analyse de sol, ou en fonction de l'exigence spécifique d'une culture.

[17] Baize D., p. 63. [18] Baize D., p. 55. [19] Genot V. *et al.*, 2007, p. 15. [20] Rappelons cependant l'importance en bio du compostage pour l'assainissement du fumier (destruction germes pathogènes et graines d'adventice). [21] Vedie H., p. 4.

Phosphore, potassium, magnésium disponibles

Ces analyses tentent d'estimer au mieux, au moyen d'extractifs d'une agressivité similaire à celle des racines, la quantité de ces éléments nutritifs qui est *disponible et assimilable* pour la culture. Il ne s'agit pas ici des teneurs totales dans l'échantillon de sol.

Contrairement au bilan de fertilisation azotée qui est un peu plus standard, la fertilisation P, K, Mg ne fait pas l'objet d'une harmonisation entre laboratoires Réquasud. Chaque laboratoire traitera différemment les résultats d'analyse et arrivera à un conseil de fumure relativement différent. Autant de recettes que de laboratoires, donc. Cela, rajouté au déficit important de publications en la matière, rend impossible une information complète et exacte aux producteurs. Le secret semble si bien gardé par les laboratoires que même l'asbl Réquasud n'est souvent pas en mesure de recalculer un conseil depuis une valeur analytique. Chaque laboratoire garde par ailleurs ses subtilités, en fonction de son expérience, voire de la sensibilité de l'agronome. Sans miracle, l'intérêt de cet article en pâtit. Nous partirons ci-dessous sur des informations valables – nous l'espérons – pour le laboratoire d'Ath, pour lequel nous avons un tout petit peu plus de données. Le bilan effectué est par ailleurs plus poussé que celui que nous vous avons présenté en partie 2/3 de cet article.

Optimums de référence K, Mg, Ca

La fertilité optimale en cations échangeables est une balance équilibrée en ces cations sur les sites d'échange. Une balance jugée idéale en terre de culture consiste en une saturation à 80 % de la C.E.C, 68% de la C.E.C. étant occupée par Ca^{2+}, 8 % par Mg^{2+} et 4 % par K^+. **Les teneurs souhaitables dans le sol sont donc considérées par le labo d'Ath comme liées à la C.E.C., et non à la culture envisagée (tomate ou encore froment d'hiver) !**

Ce niveau recommandé est également nommé « **valeur pivot** ». Les valeurs pivot de référence semblent officiellement faire l'objet d'un consensus entre les laboratoires du réseau Réquasud.

Pour le potassium, la valeur « pivot » est ainsi de 4 %[23] de la C.E.C. Exprimée en mg/100 g TSF (terre sèche fine), elle se calcule comme suit : 4/100 x 39,1 (masse molaire K) x C.E.C.

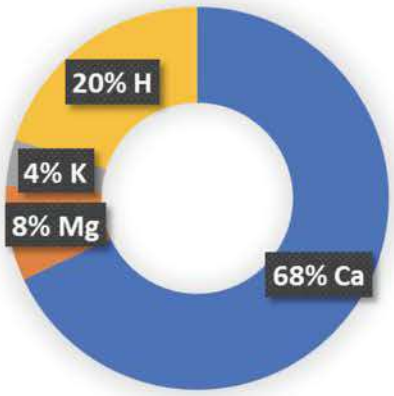
Exemple : si la C.E.C. de votre échantillon est de 12 méq/100 g, la valeur pivot en potassium est de : 4/100 x 39,1 x 12 = 18,8 mg K/100 g TSF.

Pour le magnésium, la valeur pivot est de 8 % de la C.E.C. Exprimée en mg/100 g TSF, elle se calcule comme suit : 8/100 x 12,15 (m.m. Mg, divisée par 2) x C.E.C.

Pour le calcium, la valeur recommandée est de 68 % de la C.E.C. Exprimée en mg/100 g TSF, elle se calcule comme suit : 68/100 x 20 (m.m. Ca, divisée par 2) x C.E.C.

Voici en figure 25 un tableau de qualification du niveau de fertilité, par tranches de C.E.C. Les laboratoires utilisent bien entendu la valeur précise mesurée de C.E.C., si disponible. Si vous ne connaissez pas la C.E.C. exacte de votre échantillon de sol, vous pouvez l'estimer au travers de la formule proposée plus en amont.

Composition idéale de la C.E.C.



C.E.C. (méq/100 g TSF)	Teneur en élément (mg/100 g TSF)		Très faible	Faible	Bon	Élevé	Trop élevé
	5 à 10 (sableux)	K^+	< 5,2	5,2 à 10,3	10,4 à 15,5	15,6 à 20,8	> 20,8
		Mg^{2+}	< 3,2	3,2 à 6,4	6,5 à 9,7	9,8 à 13	> 13
		Ca^{2+}	< 45	45,0 à 89,9	90,0 à 134,9	135,0 à 180,0	> 180,0
	10 à 15	K^+	< 7,8	7,8 à 15,5	15,6 à 23,3	23,4 à 31,2	> 31,2
		Mg^{2+}	< 4,9	4,9 à 9,7	9,8 à 14,5	14,6 à 19,4	> 19,4
		Ca^{2+}	< 68,0	68,0 à 135,9	136,0 à 203,9	204,0 à 272,0	> 272
	15 à 20	K^+	< 10,4	10,4 à 20,7	20,8 à 31,1	31,2 à 41,6	> 41,6
		Mg^{2+}	< 6,5	6,5 à 12,9	13,0 à 19,4	19,5 à 25,9	> 25,9
		Ca^{2+}	< 91,0	91,0 à 181,9	182,0 à 272,9	273,0 à 364,0	> 364,0
	20 à 25 (argileux)	K^+	< 13,0	13,0 à 25,9	26,0 à 38,9	39,0 à 52,0	> 52,0
		Mg^{2+}	< 8,1	8,1 à 16,1	16,2 à 24,2	24,3 à 32,4	> 32, 4
		Ca^{2+}	< 114,0	114,0 à 227,9	228,0 à 341,9	342,0 à 456,0	> 456,0

Figure 25 : Interprétation de la teneur en K, Mg, Ca en terre de culture, en fonction de la C.E.C.[24]

[22] Genot V. *et al.*, 2007, p. 15. Niveau optimal en prairie : taux de saturation 63 %, avec 54 % Ca^{2+}, 6 % Mg^{2+}, 3% K+
[23] Au labo de Tinlot, ce % de K+ va cependant également dépendre de l'exigence de la culture (4 % pour les cultures très exigeantes, 3,5 % pour les cultures moyennement exigeantes, et 3 % pour les cultures peu exigeantes). [24] Genot V. *et al.*, 2007, p. 16.

Optimums de référence P

Comme déjà écrit, la proportion de phosphore assimilable dans le sol est étroitement liée à son pH. Ainsi, les sols calcaires ou, au contraire, acides exercent un pouvoir de fixation/blocage important à l'égard du phosphore. **Le pouvoir du sol à immobiliser fortement le phosphore est aussi d'autant plus élevé que l'horizon est riche en argile, et d'autant plus faible qu'il est riche en substances organiques.**

La valeur recommandée (pivot) consensuelle au sein de Réquasud est fonction du type de texture de sol et de son pH, et se trouve actuellement au premier quart de la classe de référence de teneur suffisante (niveau bon).

Teneur en phosphore (mg/100 g TSF)		Bas	Bon	Élevé	Valeur pivot
Texture	pH_{KCl}				
Sol léger (Z et S)	< 5,5	< 5,1	5,1 à 9,0	> 9	6,1
	≥ 5,5	< 6,6	6,6 à 10,0	> 10	7,4
Sol moyen (P, L et A)	< 5,5	< 3	3,0 à 6,0	> 6	3,7
	≥ 5,5	< 4,6	4,6 à 7,5	> 7,5	5,3
Sol lourd (E, U)	< 5,5	< 2,6	2,6 à 4,5	> 4,5	3,1
	≥ 5,5	< 3,6	3,6 à 6,0	> 6	4,2

Figure 26 : Interprétation de la teneur en phosphore en terre de culture, en fonction de la texture et du pH [25]

Macro-éléments		Très faible teneur	Faible teneur	Teneur modérée	Moyenne teneur	Bonne teneur	Excès léger	Teneur excessive	Teneur souhaitable
Phosphore (mg P /100g) [4]	9,8								6,9 à 8,9
Potassium (mg K /100g) [4]	21,1								15,2 à 20,3
Magnésium (mg Mg/100g) [4]	10,8								9,5 à 12,6

L'exemple du bilan P, K, Mg pour le labo d'Ath

Grosso modo, comme illustré par la figure 27, au laboratoire d'Ath, le conseil de fertilisation P, K, Mg se calcule en prenant en compte les éléments suivants.

- « Ajustement des besoins » : les exportations de la culture, ajustées notamment selon le rendement de la région agricole ou encore le « pouvoir racinaire » d'absorption ;
- « Ajustement du sol par la voie minérale » : des corrections d'apport, pour aller vers la teneur souhaitable du sol (renforcement/impasse si sol trop (peu) pourvu – cf. plus loin –, prise en compte des pertes par lessivage, prise en compte de blocages par antagonisme K/Mg ou de rétrogradation du phosphore (si pH < 5 ou > 7)) ;
- « Offre du sol via la biofertilité » : la minéralisation P, K, Mg des matières organiques en cours de culture (humus, résidus, couverts, apports organiques récents). Si la terre est renseignée en bio, le conseil adapte à la baisse le rendement de référence, et augmente les fournitures par la « biofertilité » (+10 % pour l'azote et le soufre minéralisé depuis l'humus ; + 20 % pour le phosphore (mycorhization supérieure) ; pas de modification pour le K et Mg) ;
- Des apports organiques et minéraux tout récents ou déjà planifiés dans la fiche de renseignement jointe à l'échantillon de terre.

Avis en kg/ha	rendement de référence t/ha	Phosphore (P_2O_5)	Potasse (K_2O)	Magnésium (MgO)
Exportations nettes	40	*50*	*120*	*32*
Ajustement des besoins		50	150	32
Ajustement du sol par la voie minérale		0	27	28
Offre du sol via la biofertilité		-70	-27	-6
Bilan de fertilisation *		0	150	54
Apports organiques récents ou prévus		0	0	0
Apports minéraux récents ou prévus		0	0	0
Conseil de fertilisation*		0	150	50

Figure 27 : Exemple de bilan dans un bulletin du laboratoire d'Ath, pour un « maraîchage en culture » à fertiliser (en lien avec la figure 1)

À l'opposé, d'autres labos, comme celui de Tinlot, ne prennent pas en compte dans le bilan un apport différé (effet/arrière-effet) en P, K, Mg par les derniers couverts végétaux détruits, les matières organiques épandues et encore le précédent cultural. Voici plusieurs raisons invoquées[26] :

- Concernant les couverts, normalement, une fois dégradés (broyés ou enfouis), ils restituent très rapidement les éléments minéraux qu'ils ont stocké. Il faut juste essayer de ne pas aller prélever quand les couverts sont très développés pour ne pas sous-estimer l'offre du sol.
- Concernant les M.O. épandues, les quelques essais faits sur cette problématique ont montré que lorsqu'on prélève dans les 1 à 3 mois après l'apport, environ 50 % du P et 70 % du K et Mg sont déjà libérés et présents dans la solution du sol **et donc mesurés par l'analyse.** Le reste est libéré dans les mois qui suivent. Pour des sols sur lesquels des apports réguliers ont lieu, on peut partir sur le principe que l'entièreté de l'apport organique est libéré dans l'année.
- Concernant le précédent, si les pailles ou autres résidus sont enfouis, comme pour les couverts, la libération des éléments minéraux est très rapide. On peut ne pas en tenir compte dans le raisonnement , selon le labo de Tinlot.

Autre différence dans le bilan effectué. Le labo de Tinlot raisonne les besoins de la plante sur les besoins bruts (exportations + résidus) lorsque le sol est faiblement pourvu selon l'analyse, afin d'assurer que la plante trouvera tout ce dont elle a besoin. Seule la valeur d'exportation est par contre introduite dans le bilan si le sol présente une teneur élevée.

Le conseil de fertilisation P, K, Mg, en simplifié

Si le niveau de fertilité du sol est jugé suffisant/bon

Dans le principe, **les apports P, K, Mg à prévoir peuvent équivaloir aux exportations de la culture à venir, afin de restituer ce qui va être exporté.** Nous voyons cependant avec le bilan-type du labo d'Ath qu'on peut nettement augmenter le nombre de curseurs à prendre en compte.

Si le niveau de fertilité du sol est insuffisant/excédentaire

En cas de carence/excès dans le sol, des adaptations supplémentaires sont appliquées au bilan, différemment d'un labo à l'autre. Voici à nouveau un exemple qui nous vient du labo d'Ath. Celui-ci présente les niveaux de fertilité en 7 classes (cf. figure 27) : très faible teneur, faible teneur, teneur modérée, moyenne teneur (niveau souhaitable), bonne teneur, excès léger, excessif. **La valeur « pivot » dont nous avons parlé précédemment est ici à la charnière entre leur classe de référence « Moyenne teneur » et « Bonne teneur ».**

[25] Genot V. *et al.*, 2011, p. 15 + communication personnelle C. Mariage (Réquasud), 16/02/2022.
[26] Communication personnelle V. Genot (labo Tinlot), 3/12/2021.

Au labo d'Ath, la valeur pivot est par ailleurs située à mi-chemin entre un « seuil de renforcement » et un « seuil d'impasse » de fertilisation.

Potassium : la plage de « moyenne teneur » s'étend de 3 % à 4 % de la C.E.C. Le seuil de renforcement est à 3 % et le seuil d'impasse est à 5 %.
Magnésium : la plage de « moyenne teneur » s'étend de 6 % à 8 % de la C.E.C. Le seuil de renforcement est à 6 % et le seuil d'impasse est à 10 %.
Calcium : la plage de « moyenne teneur » s'étend de 68 % à 102 % de la C.E.C.

Quand la teneur mesurée en élément P, K, Mg est sous le seuil de renforcement, le conseil de fumure du labo d'Ath mentionne d'augmenter (renforcer/redresser) les apports annuels d'une quantité correspondant à 25 % de la différence entre cette teneur mesurée et la valeur pivot, rapportée en unités/ha sur une profondeur de 30 cm.

Quand la teneur en élément est au-dessus du seuil d'impasse, le conseil de fumure mentionne de réduire (faire l'impasse) les apports annuels d'une quantité correspondant à 25 % de la différence, entre cette teneur mesurée et la valeur pivot, rapportée en unités/ha sur une profondeur de 30 cm. Et ce durant quatre ans avant de faire une nouvelle analyse (ça peut être moins d'années si la dose de redressement est faible…).

Suite de l'exemple précédent pour le potassium :
Soit une valeur d'analyse en K de 11,8 mg K/100 g TSF (sous le seuil de renforcement, de 14,1 mg K/100 g TSF) et la valeur pivot de 18,8 mg K/100 g TSF. La différence, de −7 mg K/100 TSF, est multipliée par 40[27] pour obtenir la dose −280 kg K/ha, soit −336 kg K_2O/ha (=offre du sol en K_2O)[28].

En addition à la fertilisation correspondant (par simplification) aux exportations de la culture, une dose annuelle de « redressement » de 84 kg K_2O/ha (25 % x 336) pourra ainsi être préconisée durant quatre ans.

À noter encore

Vous pouvez trouver des exportations de référence (N-)P-K pour divers légumes à la figure 10 publiée dans le volet 2/3. L'apport massif d'engrais potassique entraîne une augmentation de la salinité autour des racines. Pour de nombreuses cultures de semis, ce stress salin peut causer une levée irrégulière, comme en carotte ou oignon. Il faut veiller à ne pas amener en une fois plus de 200 k_2O/ha[29].

Le K est un élément très mobile, et peut être lessivé dans les sols à faible C.E.C. (sols sableux et/ou à faible teneur en M.O.), où il faut davantage fractionner l'apport. L'excès de P inhibe la mycorhization, conduisant à une moins bonne nutrition globale (eau, nutriments) de la culture. Sur sol pauvre, par contre, un apport en P prend une importance plus particulière dans les cultures de printemps à l'enracinement superficiel, car la capacité des racines à l'absorber est plus limitée à ce moment lorsque le sol est froid et humide.

Il faut signaler aussi que le P est particulièrement délicat à doser correctement. Il est présent sous forme minérale et organique dans le sol, et l'analyse ne dose qu'une fraction du P présent dans les sols, fraction censée représenter le P disponible pour les plantes. **Le P organique, qui représente de 30 à 70 % du P total dans les sols wallons**, n'est pratiquement pas dosé par ces analyses[30]. Une difficulté liée à la quantification du P assimilable par les végétaux provient du fait que les plantes ont développé des mécanismes actifs de prélèvement de cet élément (enzymes, chélatants, mycorhizes, etc.).

Les rapports K/Mg et Ca/Mg

Les rapports K/Mg et Ca/Mg font partie du diagnostic en matière de conseil de fumure. Pour éviter les carences induites et blocages entre cations sur le complexe d'échange, les rapports suivants sont conseillés.

- **K/Mg : de 1 à 2**[31]. Risque de carence en Mg si rapport >2. Risque de carence en K si le rapport est <1. Cependant, Réquasud ne conseille un apport de correction que lorsque le rapport est inférieur à 0,7 ou supérieur à 2,5. Lorsque le rapport est faible, on calcule la quantité précise de K à apporter pour corriger le ratio, jusqu'à un maximum forfaitaire de 50 unités.
- Ca/Mg : de 10 à 50[32]. Risque de carence en Mg si rapport >50. C'est un déséquilibre plus rare.

Comme les autres cations, le magnésium en excès va s'opposer au prélèvement par les plantes de tous les autres éléments positifs : calcium, potassium mais aussi tous les oligoéléments (sauf le molybdène). Ainsi, l'excès de magnésium[33] dans un sol est un facteur d'aggravation des phénomènes chlorotiques. À l'inverse, tout excès de potassium ou calcium (voire sodium) va limiter l'assimilabilité du magnésium.

Les équilibres des cations sur la C.E.C. et les rapports K/Mg et Ca/Mg sont donc des éléments importants à prendre en compte quand il s'agit de choisir les fertilisants à apporter à la culture, car **l'enrichissement de la C.E.C. en un cation échangeable se fait nécessairement au détriment des autres.**

Comme le montre la figure 28, si on veut apporter du calcium sans faire baisser la teneur relative en magnésium, on peut apporter une roche dolomitique ou du Patentkali. On évitera par contre la dolomie pour rehausser le pH si le rapport K/Mg est déjà trop bas. Si on veut amener du K sans Mg, on pensera par exemple à la vinasse de sucrerie ou encore au Vivikali. Si on veut amener du magnésium seul, on pensera à la kiésérite. Si on veut fournir du calcium sans augmenter le pH, du gypse sera le bienvenu. Le S, qui est souvent apporté en parallèle, est profitable à la culture et rarement en excès.

	Teneur en K_2O (%)	Teneur en MgO (%)	Teneur en P_2O_5 (%)	Teneur en CaO (%)	Teneur en SO_3 (%)
Vivikali®	20 %				
Extrait sec de vinasse de sucrerie (99,8 % MS) – K_2SO_4	38 %				54 %
Kiésérite ($MgSO_4$) (minerai)		25 %			50 %
Patentkali® (K_2SO_4 + $MgSO_4$) (issu de minerai)	30 %	10 %		6 %	42 %
Poudre d'os			15 %	12 %	
Gypse ($CaSO_4$) (minerai)				30 %	38 %

Figure 28 : Quelques amendements riches en K, Mg, Ca, P ou S, utilisables en maraîchage bio

[27] Cf. volet 1/3 de l'article, dans *Itinéraires BIO* n°61 (passage d'une teneur en mg/100 g à un teneur en kg/ha).
[28] Dans le contexte d'un bilan P, K, Mg, on peut appeler « offre du sol » la différence négative ou positive, entre la valeur d'analyse et la valeur pivot, exprimée en kg d'oxyde par hectare. L'offre du sol en K_2O est ici négative (déficitaire) et égale à − 336 K_2O/ha.
[29] Neuweiler R., 2011, p. 10. [30] Godden B., p. 132.
[31] Tiré de https://requasol.requasud.be/requasol_element/display/k_dispo (consulté le 2 aout 2021). Le formateur maraîcher français Ch. Souillot propose, quant à lui, un rapport correct allant de 1 à 3, 3 étant selon lui l'idéal en maraîchage.
[32] Tiré de « Le chaulage et la modulation des intrants grâce au Veris », diaporama d'Adrien Bouflette, CPL-Végémar, mars 2020. Ch. Souillot propose, quant à lui, un rapport correct allant de 10 à 20.
[33] Les analyses Réquasud montrent en effet souvent des excès de Mg. Selon Ch. Sulmon (labo d'Ath), la faute en grande partie à l'apport de chaux magnésienne pour le chaulage, durant des décennies : pas trop chère, bonne VN et donc moins de tonnes à épandre…

CONSEIL DE SAISON EN MARAÎCHAGE

Soufre disponible

Les laboratoires s'y intéressent généralement encore peu en routine, mais cela change. Avec la réduction des quantités de soufre présentes dans les combustibles fossiles (mazout, fuels) et la fin de l'utilisation du charbon dans l'industrie, les retombées qui ont culminé à environ 100 kg de SO_3/ha.an ne seraient plus, aujourd'hui, en Wallonie, que de l'ordre de 17 kg SO_3/ha.an[34]. Tout comme l'azote, le soufre devient de plus en plus un élément fertilisant dont il faut tenir compte. Le S dans le sol est à 95 % sous forme organique et la minéralisation de la matière organique du sol prend de plus en plus d'importance dans l'approvisionnement. La fourniture rapide de S par la décomposition des matières organiques dépend de leur rapport C/S...

Les Brassicacées sont de loin les plus exigeantes en S, suivies des Liliacées mais aussi des Fabacées. La disponibilité du S est intrinsèquement liée à la dynamique de l'azote et à la minéralisation. Ainsi, **les carences d'approvisionnement s'observent principalement au printemps chez les espèces hivernées** présentant des besoins moyens à élevés en S, comme le chou-fleur, l'ail, l'oignon, le poireau ou l'épinard (qui, en valeur absolue, en demande peu). Les cultures d'été et d'automne sont moins demandeuses d'apports. Le S est lessivé durant l'hiver par les pluies, comme l'azote, et les cultures précoces peuvent être chlorosées sans apport d'engrais organique ou minéral soufré. On peut tabler sur des apports de l'ordre de 70 kg SO_3/ha pour combler les besoins d'une culture exigeante précoce, et de seulement 10 kg SO_3/ha[35] pour un épinard précoce.

L'optimum suivant, est proposé par le laboratoire de Tinlot, sur échantillon de sol sec, avec un réactif (type Mehlich) mesurant le soufre minéral (principalement SO_4^{2-}) et une partie du soufre organique réputée facilement disponible pour la plante. C'est une appréciation « à la grosse louche » et qui demande à être améliorée, nous précise le labo.

Soufre (mg/100g TSF)	Bas	2 Bon	5 Élevé

Figure 29 : Appréciation sommaire de la teneur en soufre disponible[36]

Oligoéléments disponibles

	TF	F	M	B	TB	E
Cu	1,0	2,0	3,0	5,0	7,0	30
Zn	1,3	2,0	4,0	6,0	12	30
Mn	9	39	72	124	174	200
Fe	20	60	120	200	300	400
B	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	1,5

Figure 30 : Appréciation sommaire de la teneur (en ppm, ou mg/kg) en oligo-éléments disponibles[37]

Ce long cheminement touche à sa fin. Nous espérons avoir pu combler partiellement un manque de documentation synthétique à ce sujet, qui vous sera utile devant vos résultats d'analyse de terre. Les nombreuses nouvelles voies d'étude de la fertilité du sol, en particulier biologique, n'ont pas été explorées dans cet article consacré aux analyses et considérations de routine. Elles sont pourtant passionnantes, et les maraîchers sont probablement avant-gardistes en la matière.

Sources
- Baize D., *Guide des analyses en pédologie*, Éditions Quae, 2018.
- Comifer (groupe PKMg), la fertilisation P–K–Mg, 2019.
- Cugnon T. *et al.*, *Établissement du conseil de fumure azotée en cultures préconisé par l'asbl Réquasud*, Réquasud, novembre 2021 (non encore publié).
- Destain J-P. *et al.*, *L'analyse du nitrate dans le sol, son intérêt en vue d'établir un conseil de fumure adapté à la parcelle*, Réquasud, 2003.
- De Toffoli M. *et al.*, *Révision des coefficients d'équivalence minérale des engrais de ferme*, UCL, 2015.
- Flisch R. *et al.*, *Caractéristiques et analyses du sol – Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF)*, Agroscope, 2017.
- Genot V. *et al.*, *La fertilité des sols agricoles et forestiers en Région wallonne*, FUSAGx-Réquasud, juin 2007.
- Genot V. *et al.*, *Un cas de fumure raisonné. Le cas du phosphore*, Réquasud, 2011.
- Gobat *et al.*, *Le sol vivant (2ème édition)*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2003.
- Godden B., *Socle de connaissance — Gestion de la fertilité des sols et des matières organiques en AB*, CRA-W, avril 2021 (version béta).
- Jestin L., *Fertilisation des légumes frais de plein champ*, Guide 2008, Chambre d'Agriculture de Bretagne.
- Marage C., *Qu'est-ce que la Capacité d'Échange cationique du sol ?*, Réquasud, 2019.
- Neuweiler R., *Lignes directrices de fumure en cultures maraîchères*, Agroscope (ACW- Suisse), 2011.
- Neuweiler R. *et al.*, *Fertilisation des cultures maraîchères – Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF)*, Agroscope, 2017.
- SCD – JMP – LMB, *Évolution dans l'interprétation des analyses – Révision des paramètres « cultures »*, Carah, 21/12/2017.
- Sinaj S. *et al.*, *Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages*, Revue suisse d'Agriculture n°41, 2009.
- Vedie H., *Fertilité chimique du sol : savoir interpréter les analyses pour gérer les apports d'éléments majeurs (phosphore, potasse, magnésie) en maraîchage biologique*, GRAB, 2008.

[35] Neuweiler R., 2017, p. 10. [36] Communication personnelle V. Genot (labo de Tinlot). [37] SCD – JMP – LMB.