Agroscope une bonne alimentation, un environnement sain

2/ Caractéristiques et analyses du sol

René Flisch[1], Reto Neuweiler[2], Thomas Kuster[2], Hansrudolf Oberholzer[1], Olivier Huguenin-Elie[1] et Walter Richner[1]
[1] Agroscope, 8046 Zurich, Suisse
[2] Agroscope, 8820 Wädenswil, Suisse

Renseignements: rene.flisch@agroscope.admin.ch

Table des matières

1. Introduction 2/3
2. Caractérisation du site 2/3
   - 2.1 Granulométrie et type de sol 2/3
   - 2.2 Teneur en humus 2/4
   - 2.3 Le pH du sol 2/5
   - 2.4 Etat calcique du sol 2/5
3. Analyses de sol et interprétation des résultats 2/6
   - 3.1 Recommandations pour les analyses de sol 2/6
   - 3.2 Méthodes d'analyse de sol 2/7
   - 3.3 Choix de la méthode d'analyse pour l'examen de base 2/7
   - 3.4 Interprétation des résultats des analyses de P, K et Mg pour déterminer le besoin en engrais 2/9
4. Approvisionnement du sol en éléments nutritifs 2/10
   - 4.1 Correction de la fertilisation P et K selon la méthode CO_2 ..... 2/10
   - 4.2 Correction de la fertilisation Mg selon la méthode $CaCl_2$ 2/12
   - 4.3 Correction de la fertilisation P, K et Mg selon la méthode H_2O10 ..... 2/12
   - 4.4 Correction de la fertilisation P, K et Mg selon la méthode AAE10 ..... 2/13
   - 4.5 Détermination des besoins en engrais P, K et Mg 2/16
   - 4.6 Particularités de l'utilisation des engrais P, K et Mg 2/16
   - 4.7 Autres éléments nutritifs et micro-éléments 2/21
5. Chaulage 2/24
   - 5.1 Détermination des apports de chaux sur la base du pH 2/24
   - 5.2 Détermination des apports de chaux sur la base de la capacité d'échange des cations et de la saturation en bases 2/25
   - 5.3 Indications particulières pour le chaulage 2/25
6. Fertilité du sol et gestion de l'humus 2/27
   - 6.1 Le concept de fertilité du sol 2/27
   - 6.2 Fonctions et propriétés des sols 2/28
   - 6.3 Entretien de la teneur en humus à long terme – aide à la décision et mesures adéquates 2/28
7. Bibliographie 2/30
8. Liste des tableaux 2/32
9. Liste des figures 2/33

Couverture: profil d'un sol agricole (photo: Gabriela Brändle, Agroscope).

1. Introduction

Le sol joue un rôle primordial en tant que facteur de production en vue d'obtenir des aliments et des fourrages de haute qualité, car c'est bien lui qui fournit l'eau et les éléments nutritifs aux plantes. Pour la croissance des plantes, il est nécessaire que le sol soit en bon état physique et suffisamment pourvu en éléments nutritifs disponibles comme l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K), le magnésium (Mg), le soufre (S) et divers micro-éléments, le tout dans des proportions équilibrées.

La fertilisation permet de réaliser des conditions optimales pour la croissance et la formation du rendement des plantes cultivées. En même temps, il faut veiller à ce qu'il y ait le moins possible de pertes d'éléments nutritifs polluant l'environnement. Pour une utilisation efficiente des éléments nutritifs qui corresponde aux besoins des plantes tout en préservant l'environnement, il faut absolument tenir compte de l'état d'approvisionnement du sol en éléments nutritifs (figure 2, module 1).

Les analyses de sol permettent de quantifier ses caractéristiques physiques et chimiques et notamment d'apprécier son état d'approvisionnement. Pour déterminer les besoins en engrais, il est important de choisir des méthodes appropriées permettant d'évaluer la disponibilité pour les plantes de l'élément nutritif concerné et donc l'état d'approvisionnement du sol. Une évaluation fondée des résultats d'analyse doit pouvoir être placée en regard des objectifs de rendement et de qualité. En général, ce ne sont que les résultats d'essais en champs de longue durée qui permettent de préciser ce genre de relation. La méthode d'analyse et l'interprétation de ses résultats sont deux éléments indissociables. Ceci, parce que différentes méthodes d'analyse, selon leurs spécificités, fournissent des résultats différents, non substituables et en général insuffisamment corrélés entre eux.

2. Caractérisation du site

Les propriétés chimiques du sol ne sont pas les seules à influencer le développement des cultures. Les propriétés physiques et d'autres paramètres, comme la profondeur utile (volume disponible pour les racines) la pierrosité (part de squelette) ainsi que la structure du sol jouent également un rôle important. La structure du sol détermine son régime hydrologique et son aération, ce qui influence indirectement, mais dans une large mesure, le développement des racines. Ainsi, le manque d'oxygène inhibe le développement racinaire dans les sols en mauvais état structural et compactés, et le risque de maladies des racines est plus élevé dans les sols temporairement détrempés. La capacité du système racinaire d'absorber les éléments nutritifs est fortement diminuée lorsque celui-ci est affaibli de la sorte, ce qui ne peut pas être compensé par une augmentation de la fertilisation.

Il est très important, dans les terrains où l'on veut installer une culture pérenne, de procéder préalablement à une évaluation du profil du sol (figure 1). Ceci permettra de définir les aptitudes culturales du sol et de déterminer les éventuels besoins en mesures d'assainissement comme le drainage, un travail du sol particulier ou encore le choix du porte-greffe dans les cultures fruitières ou en viticulture. Des analyses physiques et chimiques des différents horizons donnent des informations sur la stabilité structurale, la dynamique des éléments nutritifs dans le sous-sol ainsi que leur translocation horizontale et verticale.

Figure 1. Evaluation du profil du sol (photo: Andreas Naef, Agroscope).

L'ensemble des processus biologiques dans le sol sont résumés sous le terme d'«activité biologique du sol». C'est un indicateur important de la fertilité du sol (chapitre 6).

2.1 Granulométrie et type de sol

La granulométrie de la terre fine (diamètre ≤ 2 mm), que l'on appelle aussi texture du sol, est définie par la proportion des différents calibres de particules minérales (argile, silt et sable).

Ensemble, la granulométrie et la teneur en humus (chapitre 2.2) permettent de définir le type de sol (p. ex. limon sableux humifère). Le type de sol influence:

- les disponibilités potentielles en éléments nutritifs;
- la dynamique des éléments nutritifs dans le sol;
- la sensibilité au tassement;
- la stabilité de la structure (et par là le risque d'érosion et de ruissellement);
- la perméabilité à l'eau;
- la réaction au travail du sol.

La granulométrie est importante pour la compréhension de nombreuses fonctions du sol. Il en est tenu compte dans l'interprétation de nombreux paramètres analysés. La granulométrie ne se modifie pratiquement pas au cours du temps; ainsi, une détermination représentative unique par parcelle suffit. La mesure granulométrique peut être remplacée par une appréciation tactile, quoi qu'elle n'ait pas la

Tableau 1. Relation entre classes de teneur en argile et les propriétés des sols.

	Valeurs de seuil pour l'interprétation des analyses chimiques				
	Sols sableux	Sols sableux-limoneux [1]	Sols limoneux [1]	Sols argilo-limoneux [1]	Sols argileux
Propriétés	**< 10 % d'argile**	**10–19,9 % d'argile**	**20–29,9 % d'argile**	**30–39,9 % d'argile**	**≥ 40 % d'argile**
Perméabilité à l'eau	très bonne	bonne	bonne	moyenne	faible
Capacité hydrique	faible	moyenne	élevée	élevée	très élevée [1]
Aération	très élevée	bonne	bonne	moyenne	faible
Capacité de rétention pour les éléments nutritifs	faible	faible à moyenne	moyenne	bonne	très bonne [1]
Travail du sol	facile	facile	moyen	moyen à difficile	difficile
Pénétration des racines	très bonne	très bonne	bonne	médiocre	faible

[1] Disponibilité particulière pout les plantes.

précision d'une mesure. La classification des sols selon leur teneur en argile et les propriétés correspondantes figurent dans le tableau 1.

2.2 Teneur en humus

L'ensemble des composants du sol d'origine animale et végétale sont inclus sous le terme «matière organique du sol». Une petite partie de cette matière organique est composée d'éléments vivants (racines de plantes, microorganismes et animaux du sol). La part la plus importante, qui constitue l'humus, renferme l'ensemble des substances organiques mortes du sol. Toutefois, l'analyse de sol, destinée à la caractérisation du site et au conseil de fertilisation, ne peut pas faire la distinction. La matière organique présente dans l'échantillon de terre soumis à l'analyse est considérée comme étant de l'humus.

La quantité et la constitution de la matière organique conditionnent de nombreux processus dans le sol:

- Dans les processus compris sous le terme de minéralisation, il s'agit d'une décomposition de la matière organique. Il s'en dégage du dioxyde de carbone, de l'eau et des éléments nutritifs, principalement de l'azote (N). Les processus de minéralisation peuvent être influencés par différents facteurs. Une élévation de la température du sol et un rapport optimal des teneurs en eau et en air stimulent la décomposition de la matière organique. Pour conserver la fertilité du sol à long terme, il est vital de maintenir un équilibre entre la formation d'humus et sa minéralisation (voir aussi le chapitre 6).

Tableau 2. Classification pédologique des teneurs en humus (SSP 2010).

Teneur en humus [1] en % poids	Appréciation
< 2 %	pauvre en humus
2–5 %	faiblement humifère
5–10 %	humifère
10–30 %	riche en humus
≥ 30 %	très riche en humus (tourbeux)

[1] La teneur en humus du sol correspond à sa teneur en carbone organique (C_{org}) multipliée par 1,725.

Tableau 3. Interprétation agronomique de la teneur en humus du sol pour une appréciation du potentiel de fourniture de N par le sol.

Appréciation de la teneur en humus du sol [1] (%) en regard des différentes classes de teneur en argile				Potentiel de fourniture de N
< 10 % d'argile	**10–19,9 % d'arg.**	**20–29,9 % d'arg.**	**≥ 30 % d'argile**	
< 1,2	< 1,6	< 2,0	< 2,5	faible
1,2–2,9	1,6–3,4	2,0–3,9	2,5–5,9	satisfaisant
3,0–4,9	3,5–6,9	4,0–7,9	6,0–9,9	bon
5,0–19,9	7,0–19,9	8,0–19,9	10,0–19,9	élevé
≥ 20,0	≥ 20,0	≥ 20,0	≥ 20,0	très élevé

[1] La teneur en humus du sol correspond à sa teneur en carbone organique (C_{org}) multipliée par 1,725.

- La teneur en humus joue un rôle important sur la structure du sol. Par la formation de complexes argilo-humiques, il se crée des grumeaux stables. Ceux-ci augmentent la porosité et, par conséquent, la perméabilité du sol à l'eau et son aération. Une bonne stabilité des agrégats diminue le risque d'érosion. Dans la plupart des cas, une infiltration de l'eau suffisante est assurée, même en cas de fortes pluies. Les sols avec un taux d'humus moyen à élevé sont bien colonisés par les racines des plantes.

Les différentes teneurs du sol en humus sont réparties en cinq classes qui peuvent être appréciées soit du point de vue des propriétés physico-chimiques et pédologiques (tableau 2), soit du point de vue agronomique par leurs effets sur le potentiel de fourniture de N par le sol (tableau 3). Au plan agronomique, plus la teneur en argile est élevée, plus il faut tendre vers une teneur en humus élevée. Pour un mode d'exploitation du sol stable, la teneur en humus n'évolue que très lentement, même avec des apports importants de matière organique.

2.3 Le pH du sol

La mesure du pH permet de caractériser les sols en fonction de leur acidité ou de leur alcalinité. Le pH est mesuré dans une suspension aqueuse. Le résultat correspond à la teneur en ions hydrogène et est attribué à l'une des six classes prévues (tableau 4). Le pH se modifie peu au cours du temps; néanmoins, il est recommandé de le mesurer à espaces réguliers, en particulier dans les sols acides ou neutres.

Le pH du sol influence l'activité biologique dans le sol et la disponibilité de certains éléments nutritifs, notamment P et Mg, ainsi que la majorité des microéléments (figure 2). La disponibilité du P est optimale en sols légèrement acides à neutres. En sols alcalins, une part importante du P se trouve sous forme de phosphates de calcium, peu solubles. Plus le pH est élevé, moins le fer (Fe), le manganèse (Mn), le zinc (Zn) et le bore (B) sont disponibles; en revanche, celle du molybdène (Mo) augmente. Par ailleurs, l'acidification du sol entraîne une nette augmentation de la solubilité du manganèse (Mn) et de l'aluminium (Al). Globalement, un pH trop bas ou trop élevé peut entraîner des carences en éléments nutritifs sur les cultures sensibles, voire de la phytotoxicité sur certaines espèces maraichères.

Le pH fournit une indication approximative sur l'état calcique du sol et oriente le choix des engrais, en particulier les engrais phosphatés, voire un amendement du sol adéquat. Des données sur l'évaluation de l'état calcique du sol et du besoin de chaulage figurent dans le chapitre 5.

2.4 Etat calcique du sol

L'état calcique du sol est un facteur important pour une utilisation agricole durable des terres. Il est conditionné par la nature de la roche-mère dont le sol est issu, et soumis aux effets des précipitations et du mode d'exploitation du sol.

La teneur en carbonate ($CaCO_3$) du sol joue un rôle important dans les processus chimiques, physiques et biologiques. Les processus suivants sont les plus influencés par la décomposition des carbonates et leur migration:

Tableau 4. Appréciation du pH du sol et du besoin en chaux.

pH(H_2O)	Appréciation	Test HCl	Appréciation	Chaulage [1]
< 5,3	très acide	–	non calcaire	chaulage nécessaire
5,3–5,8	acide	–	non calcaire	chaulage nécessaire
5,9–6,7	peu acide	–	non calcaire	chaulage d'entretien
6,8–7,2	neutre	–	non calcaire	chaulage d'entretien
		+	calcaire	chaulage d'entretien [2]
7,3–7,6	peu alcalin	+	calcaire	chaulage inutile
> 7,6	alcalin	++	fortement calcaire	chaulage inutile

[1] Il faut tenir compte des spécificités des cultures.
En production fourragère, prendre en considération la végétation naturelle et les espèces adaptées aux conditions du site (chapitre 5.3.2).

[2] Seulement si l'on observe une baisse du pH.

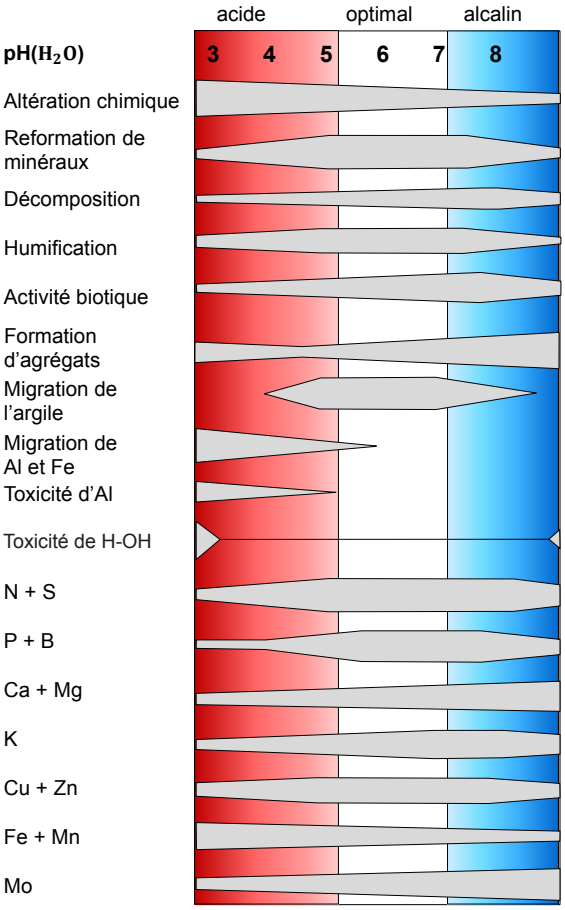

Figure 2. Schéma des relations entre le pH et la pédogenèse ainsi que les facteurs écologiques. La largeur des bandes indique l'intensité des processus et la disponibilité des éléments nutritifs (selon Schröder, 1984, modifié).

- **Effet calcaire chimique**: la teneur en carbonate de Ca influence le pH du sol et ainsi directement la disponibilité des éléments nutritifs.
- **Effet calcaire physique**: le calcium libre (Ca^{2+}), issu de la dégradation du carbonate de Ca, favorise la formation d'agrégats (formation de ponts entre les particules d'argile et d'humus) et donc la stabilité de la structure du sol. Dans les sols lourds et dans les sols sensibles à l'érosion, le chaulage vise principalement une amélioration de la structure, facilitant ainsi les échanges gazeux et hydriques; le développement des racines en profite indirectement.
- **Effet calcaire biologique**: cette action est indirecte. Un pH optimal et une bonne circulation de l'air et de l'eau sont favorables aux organismes du sol. Ainsi, il y a stimulation des processus de décomposition et de métabolisation, tels que la décomposition des résidus de récolte, la synthèse de formes d'humus stable ou la minéralisation d'éléments nutritifs.

L'approvisionnement des plantes en Ca, un élément essentiel qui est utilisable après la décomposition des carbonates en Ca libre, est un processus d'importance secondaire. Même dans les sols acides, il y a suffisamment de Ca soluble ou échangeable pour couvrir les besoins de la majorité des plantes. Il n'y a que dans les sols très pauvres en Ca qu'un chaulage ou l'application d'engrais calciques soit nécessaire pour satisfaire les besoins des plantes.

Les pertes de calcaire se produisent avant tout par lessivage, l'effet neutralisant dans le sol et par les prélèvements des plantes en Ca; les sols concernés ont besoin d'un amendement calcaire conséquent. Les pertes annuelles peuvent aller jusqu'à plusieurs centaines de kilos de $CaCO_3$ par hectare. La mesure du calcaire total ne suffit souvent pas à définir les besoins en chaulage. Dans de tels cas, il faut recourir à la mesure de la capacité d'échange des cations et du taux de saturation en bases (chapitre 5).

3. Analyses de sol et interprétation des résultats

Une analyse de sol est indispensable pour établir un plan de fumure conforme aux besoins des plantes et protégeant l'environnement. C'est pourquoi il est recommandé de déterminer les éléments nutritifs dans le sol à des intervalles réguliers (tableau 5).

3.1 Recommandations pour les analyses de sol

Pour une fertilisation dirigée, il faut connaître les besoins des plantes en éléments nutritifs et tenir compte des propriétés du sol. Les caractéristiques physiques du site comme la granulométrie ne sont déterminées généralement qu'une seule fois, pour autant qu'aucune amélioration foncière du sol n'ait été entreprise. Dans le cas des cultures pérennes, il est recommandé de procéder à une telle analyse une fois avant chaque renouvellement de la plantation.

Dans les cultures pérennes en particulier, il est nécessaire de connaître le volume de sol utile pour les racines; en arboriculture et en viticulture il est important d'analyser le sol et le sous-sol avant d'installer un nouveau verger ou une nouvelle vigne. Par la suite, on ne prélève des échantillons que dans l'horizon supérieur, à moins que des problèmes de croissance ou de qualité aient été constatés. Les profondeurs de prélèvement recommandées pour différents groupes de cultures sont consignées dans le tableau 5.

Les analyses physiques et chimiques, telles qu'utilisées pour le conseil de fertilisation, sont effectuées sur un échantillon constitué d'un mélange de prélèvements représentatifs d'une certaine surface. La fiabilité des résultats obtenus dépend beaucoup de la qualité des prélèvements. En effet, les erreurs liées au prélèvement peuvent atteindre un multiple de la somme de toutes les erreurs possibles en laboratoire. Pour constituer un bon échantillon, il faut que la zone choisie soit représentative de la surface à échantillonner, la prise d'échantillons (piqûres) bien répartie et le moment de prélèvement bien choisi.

3.1.1 Définition d'une surface représentative

Lors de la prise d'échantillons, il faut veiller à procéder aux sondages dans une zone de la parcelle où les propriétés du sol sont homogènes, de même que la croissance des cultures. Si la parcelle est régulière, un seul échantillon composé suffit. Si le mode d'exploitation ou l'aspect des cultures laisse supposer des différences au niveau du sol, ou si l'aspect et la couleur du sol changent d'une piqûre à l'autre, il s'agit alors de définir des sous-parcelles homogènes et de les échantillonner séparément.

3.1.2 Déroulement de l'échantillonnage d'une surface définie

Pour obtenir un échantillon de terre représentatif, 20 à 25 piqûres sont nécessaires, indépendamment de la taille de la parcelle, et réparties régulièrement (voir les Méthodes de référence des stations de recherche Agroscope, volume 1, Agroscope 1996). L'échantillon final (env. 1 kg) suffit pour sa préparation et les analyses au laboratoire selon les prescriptions (figure 3). Il faut éviter que seule une partie des échantillons prélevés ne parvienne au laboratoire, car il est difficile et compliqué de procéder au mélange afin d'obtenir un matériel homogène. Pour certaines techniques culturales (par exemple des lignes d'arbres enherbées ou non, des voies de passage fertilisées ou non en culture fruitière, etc.), des indications se trouvent dans les modules correspondants.

Figure 3. Préparation des échantillons de terre pour l'analyse en laboratoire: tamisage à 2 mm pour séparer la terre fine du squelette (photo: René Flisch, Agroscope).

3.1.3 Fréquence des analyses de sol

La fréquence des analyses de terre dépend des cultures pratiquées (tableau 5). Des analyses de sol régulières permettent d'optimiser les quantités d'engrais futures et de contrôler l'effet des corrections pratiquées antérieurement.

3.1.4 Indications générales concernant l'échantillonnage

Une évaluation de l'évolution à long terme des teneurs en éléments nutritifs dans le sol, et en particulier la comparaison avec le bilan entre éléments nutritifs apportés et ceux

Tableau 5. Recommandations pour la prise d'échantillons de terre pour différents groupes de cultures agricoles.

Le moment optimal pour l'échantillonnage dépend du groupe de cultures concerné. En général, il se situe après la récolte de la culture principale ou, en production herbagère, après la dernière coupe, mais dans tous les cas avant l'application de la fertilisation (chapitres 3.1.1 à 3.1.4).

Groupe de cultures	Profondeur de prélèvement (cm)	Périodicité [1]	Remarques
Terres assolées	0–20	4–6 ans	De préférence toujours au même stade de la rotation
Prairies permanentes et pâturages	0–10	5–10 ans	Eviter les refus et les bouses, les entrées de pâturage, les zones de repos et les alentours des abreuvoirs
Légumes en pleine terre	0–20	4–6 ans	De préférence pendant la dernière culture de légumes de l'année
Légumes sous serre	0–20	2 ans	De préférence pendant la dernière culture de légumes de l'année
Viticulture	2–25 (couche supérieure)	5–10 ans	Avant une nouvelle plantation ou pépinière et pour le contrôle périodique des teneurs en éléments nutritifs. Après d'importantes corrections de fertilisation dans les sols pauvres ou excessivement riches, tous les 5 ans, sinon tous les 10 ans
	25–50 (sous-sol)	une fois	Avant une nouvelle plantation ou pépinière et dans les vergers ayant des problèmes culturaux ou de qualité
Arboriculture	2–25 (couche supérieure)	5–10 ans	Avant une nouvelle plantation ou pépinière et pour le contrôle périodique des teneurs en éléments nutritifs. Adapter la prise d'échantillons aux techniques de culture et de fertilisation
	25–50 (sous-sol)	une fois	Avant une nouvelle plantation ou pépinière et dans les vergers ayant des problèmes culturaux ou de qualité
Cultures de baies	0–20	4–6 ans	Pour les cultures annuelles, de préférence pendant la culture précédente.
	2–25	5–10 ans	Cultures pluriannuelles: avant la nouvelle plantation et pour le contrôle périodique des teneurs en éléments nutritifs
Plantes aromatiques et médicinales	0–20	4–6 ans	De préférence pendant la culture précédente
Autres cultures	0–20	env. 5 ans	

[1] En cas d'importantes modifications de surface, de niveau de fertilité bas lors des dernières analyses ou de croissance irrégulière de la culture, il faut choisir l'intervalle court.

prélevés par les plantes, n'est pertinente que si les prélèvements de sol sont effectués en respectant strictement les conditions nécessaires à un échantillonnage correct (emplacement, moment donné dans la rotation, profondeur d'échantillonnage, etc.). Il est dès lors recommandé d'effectuer les prélèvements dans une parcelle toujours à la même saison, après la récolte de la même culture, et dans tous les cas avant l'application d'une fertilisation. En cultures herbagères, le meilleur moment pour prélever les échantillons se situe en automne, juste après la dernière coupe. Dans les prairies pâturées, éviter de planter la sonde dans les refus ou bouses visibles.

La description détaillée d'une prise d'échantillons correcte dans différents groupes de cultures, permettant de garantir la validité des résultats, se trouve dans les Méthodes de référence des stations de recherche Agroscope (Agroscope, 1996). Les laboratoires et les services de vulgarisation agricole peuvent aussi fournir les documents nécessaires.

3.2 Méthodes d'analyse de sol

Les méthodes principales actuellement utilisées par Agroscope sont décrites dans le tableau 6. Elles sont validées par les résultats de nombreux essais en plein champ durant des dizaines d'années.

3.3 Choix de la méthode d'analyse pour l'examen de base

Les propriétés d'un site, comme la texture, ne se modifient pas au cours du temps avec un mode d'exploitation usuel. Il n'est donc pas utile de les soumettre à une analyse régulière. Une détermination analytique de base unique, préférable à l'estimation (par exemple test tactile), est suffisante pour disposer des paramètres de teneurs en argile et silt indispensables à l'interprétation des teneurs en éléments nutritifs dans le sol et à la connaissance de leur comportement.

Pour la détermination des teneurs en P, K et Mg dans le sol et les besoins en engrais, on dispose de plusieurs méthodes en Suisse. Les méthodes d'extraction douce utilisent l'eau saturée de CO_2 pour définir P et K (méthode CO_2), le chlorure de calcium pour Mg (méthode $CaCl_2$) ou encore l'extrait à l'eau pour P, K et Mg (méthode H_2O10). Une autre méthode d'extraction, plus agressive, recourt à l'acétate d'ammonium + EDTA, désignée aussi méthode AAE10.

L'extraction douce permet de quantifier les éléments nutritifs solubles, immédiatement disponibles pour les plantes, ce qui correspond au facteur «intensité», soit l'activité des ions nutritifs dans la solution de sol (Frossard *et al.*

Tableau 6. Principales méthodes d'analyse de sol utilisées par Agroscope pour optimaliser la fertilisation des cultures agricoles.

La description des méthodes figure dans les Méthodes de référence des stations de recherche Agroscope (Agroscope 1996).

Paramètre analysé (élément nutritif ou caractéristique du sol)	Solutions/méthodes d'extraction	Rapport terre/solution d'extraction	Temps d'agitation et d'extraction	Unité de mesure et méthode de calcul
P (Méthode CO_2)	Eau saturée de CO_2	1:2,5	1 h	Indice P 1 = 0,0356 mg P_2O_5 par 100 g de terre (ou 0,155 mg P par kg de terre)
K (Méthode CO_2)	Eau saturée de CO_2	1:2,5	1 h	Indice K 1 = 1 mg K_2O par 100 g de terre (ou 8,3 mg K par kg de terre)
Mg	0,0125 M $CaCl_2$	1:10	2 h	Indice Mg 1 = 1 mg Mg par 100 g de terre (ou 10 mg Mg par kg de terre)
Mn, échangeable	1 M acétate d'ammonium	1:10	30 min.	mg Mn par kg de terre
Mn, réductible	1 M acétate d'ammonium + hydroquinone	1:10	30 min.	mg Mn par kg de terre
B	Eau chaude	1:5	5 min. (refroidissement par flux inverse)	mg B par kg de terre
H+	Eau distillée	1:2,5	12 h	Valeur pH ($pH_{(H_2O)}$)
$CaCO_3$ (calcaire total)	HCl concentré dilué 1:1 (volumes)			% volume de $CaCO_3$ g $CaCO_3$ par 100 g de terre
P, K, Mg (Méthode H_2O10)	Eau distillée	1:10	1 h	mg P, K ou Mg par kg de terre
P, K, Mg, Ca (Méthode AAE10)	0,5 M acétate d'ammonium + 0,5 M acide acétique + 0,025 M EDTA	1:10	1 h	mg P, K, Mg ou Ca par kg de terre
Granulométrie[1] - argile - silt - sable	 Sédimentation Sédimentation Calcul			 g par 100 g de terre g par 100 g de terre g par 100 g de terre
Humus[1]	Combustion par voie humide avec du $K_2Cr_2O_7$ et titration			% C organique ($C_{org.}$) % humus = % $C_{org.}$ × 1,725
Humus, argile, silt (estimé)	Test tactile			%
Capacité d'échange des cations (CEC)	En sol avec $pH_{(H_2O)} \leq 5,9$			CEC = ($H^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+$) cmol+ par 100 g de terre (ancienne unité: méq/100 g de terre)
K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+	0,05 M HCl + 0,0125 M H_2SO_4	1:4	5 min	
H^+	pH par différence	1:1	5 min	
Capacité d'échange des cations (CEC)	En sol avec $pH_{(H_2O)} > 5,9$	1:25	15 h à 45 °C, puis agitation 1 h	CEC = ($H^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+$) cmol+ par 100 g de terre (ancienne unité: méq/100 g de terre)
K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+	0,1 M chlorure de baryum + 2 M triéthanolamine			
H^+	Titration			
Saturation des bases (SB)	Calcul		–	SB (%) = ($K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+$) cmol+ × 100 / CEC
NO_3-N NH_4-N	0,0125 M $CaCl_2$	1:4	1 h	kg N_{min} par ha

[1] Granulométrie de la terre fine: la somme des % d'argile, de silt, de sable et d'humus = 100%.

2004). Dans le cas d'un agent d'extraction agressif, on part du principe que les éléments nutritifs extraits sont potentiellement utilisables par les plantes (quantité d'éléments nutritifs qui peuvent passer à tout moment en solution et ainsi être disponibles pour les plantes); cela correspond au facteur «quantité» (Frossard *et al.* 2004).

Les éléments nutritifs extraits par la méthode AAE10 (voir les précisions dans le chapitre 4.4) ne correspondent pas au facteur «quantité» dans tous les cas, car ils dépendent de la nature du sol. Des éléments nutritifs non disponibles pour les plantes peuvent être extraits, pour P en particulier (Demaria *et al.* 2005). Avec la méthode AAE10, dans les sols sans carbonates et pauvres en Ca, les phosphates à l'état métallique non disponibles pour les plantes (qu'on appelle fraction de réserve) sont dissous. La proportion de ces phosphates dans l'extrait AAE10 dépend de la composition minéralogique du sol et ne peut pas être estimée (Stünzi 2006b). En revanche, dans les sols calcaires, le $CaCO_3$ est dissous et les ions Ca^{2+} sont présents en excès dans l'extrait, avec comme conséquence la perte de la capacité d'extraction de l'EDTA pour d'autres éléments (Zimmermann 1997; Stünzi 2006b). La méthode AAE10 n'est donc valable que pour les sols sans carbonates.

Le choix de la méthode d'analyse pour déterminer les éléments nutritifs dépend des besoins du demandeur et des cultures concernées ainsi que de la disponibilité du schéma d'interprétation correspondant (tableau 7).

3.4 Interprétation des résultats des analyses de P, K et Mg pour déterminer le besoin en engrais

L'interprétation des analyses de sol est basée sur les résultats collectés en essais de plein champ pendant plusieurs années et en différents endroits (figure 6). Les relations entre les teneurs du sol et des plantes en éléments nutritifs ainsi que la réaction des plantes à la fertilisation forment un ensemble de critères importants pour une interprétation valable des analyses.

Le calcul des besoins en engrais, en tenant compte des teneurs en éléments nutritifs dans le sol, se pratique avec des facteurs de correction qui permettent d'ajuster la dose d'engrais (libellées en kg de nutriments par ha). Le niveau de fertilité de P, K et Mg dans le sol peut être divisé en cinq classes, définies selon les facteurs de correction présentés dans le tableau 8.

Le niveau des nutriments dans le sol pour une croissance optimale des plantes n'est pas identique pour toutes les cultures. Dans le domaine des grandes cultures et cultures herbagères, les schémas d'interprétation sont adaptés aux cultures possédant une capacité moyenne à bonne de s'approprier les éléments (p. ex. céréales de printemps, colza, tournesol, pois). Ces espèces sont capables de se développer sans pénalisation ni du rendement ni de la qualité de la récolte, en l'absence de fertilisation préalable sur un sol classé au niveau de fertilité C. Une fertilisation correspondant aux prélèvements de la culture est suffisante pour maintenir le niveau de fertilité du sol. Pour les cultures qui ont une bonne capacité à s'approprier les éléments nutritifs (p. ex. les céréales d'automne, les betteraves) ou au contraire une faible capacité (p. ex. pommes de terre, trèfle), le niveau C n'est pas optimal (voir aussi le chapitre 4.6). La norme de fertilisation est corrigée en conséquence et ne correspond plus exactement aux prélèvements. A long terme, cela peut entraîner une modification du niveau de fertilité du sol. Des analyses de sol régulières permettent d'identifier d'éven-

Tableau 7. Choix de la méthode d'analyse de base pour différents groupes de cultures.

Groupes de cultures	Paramètres analysés et méthode de référence [1] [Code de méthode]						
	Caractéristiques su sol				Eléments nutritifs (P, K, Mg, Ca) [2]		
	$pH_{(H_2O)}$ [pHH]	$CaCO_3$ [$CaCO_3$]	Humus [C_{org}]	Granulométrie [KOF]	P, K, Mg [CO_2/CCMg]	P, K, Mg, Ca [AAE10] [3]	P, K, Mg [H_2O10] [4]
Terres assolées	x	x	x	x	x	x	
Prairies permanentes et pâturages	x	x	x	x	x	x	
Légumes (en pleine terre et sous serre)	x	x	x	x		x	x
Viticulture [5]	x	x	x	x		x	x
Arboriculture	x	x	x	x		x	x
Cultures de baies	x	x	x	x		x	x
Plantes aromatiques et médicinales	x	x	x	x			x
Autres cultures	x	x	x	x	x	x	x

[1] Méthodes de référence des stations de recherche Agroscope, volume 1: Analyses de terre pour le conseil de fumure (Agroscope 1996).

[2] En conditions particulières, il peut être nécessaire de doser d'autres éléments nutritifs (p. ex. Mn et B en terres humifères ou alcalines). Méthodes dans le tableau 6.

[3] P et Mg seulement en sols non calcaires.

[4] P ne peut être interprété que dans les sols avec pH entre 5,0 et 7,8 (Gysi *et al.* 1993; Gysi *et al.* 1997).

[5] Pour une fertilisation provisionnelle en K dans de nouvelles plantations, on peut se baser sur la teneur en K de la méthode CEC (voir tableau 6 et module 12).

Figure 4. Filtration des extraits de sol (photo: Diane Bürge, Agroscope).

Figure 5. Détermination de divers éléments par spectrométrie en absorption atomique (AAS) (photo: Diane Bürge, Agroscope).

Figure 6. Essai de longue durée mis en place en 1989. Des doses différentes de P, K et Mg servent de base pour l'interprétation des analyses de sol (photo: René Flisch, Agroscope).

Tableau 8. Appréciation de l'état de fertilité des sols basée sur les facteurs de correction définis dans les tableaux 10 à 18.

Facteur de correction	Appréciation	Classe de fertilité
> 1,4	pauvre	A
1,2–1,4	médiocre	B
0,9–1,1	satisfaisant	C
0,4–0,8	riche	D
< 0,4	très riche	E

tuelles modifications et de corriger la fertilisation en conséquence.

Pour l'interprétation des teneurs en éléments nutritifs dans le sol, la capacité d'échange des cations est un paramètre important. Il y a une corrélation étroite entre la capacité d'échange des cations et la teneur en argile du sol. Un contenu du sol élevé en cations multivalents entraîne une plus forte charge positive des adsorbants des phosphates et par là une plus forte adsorption électrostatique de l'anion phosphate. Pour cette raison, il est indiqué d'apprécier les teneurs du sol en P, K et Mg fournies par l'analyse en fonction de la part d'argile dans la terre fine du sol (tamisée à ≤ 2 mm), analysée ou estimée. Dans les sols contenant plus de 10% d'humus, cette teneur est prise aussi en compte dans l'interprétation.

Les facteurs de correction définis (chapitres 4.1 à 4.4) doivent être appliqués à la fertilisation de toutes les cultures jusqu'à la prochaine analyse de sol.

4. Approvisionnement du sol en éléments nutritifs

Le calcul de la fertilisation P, K et Mg se base sur le principe du remplacement des éléments nutritifs prélevés par les cultures dans des sols normalement pourvus en ces éléments. L'adaptation de la fertilisation à la teneur en éléments nutritifs du sol se fait d'après les facteurs de correction décrits dans les chapitres 4.1 à 4.4 selon la méthode d'analyse appliquée et l'élément nutritif concerné.

Ces facteurs de correction sont établis d'après les résultats d'analyses et les teneurs en argile, ceci pour les sols jusqu'à 10% d'humus. Comme l'humus influence la disponibilité des éléments nutritifs, pour les sols qui en contiennent plus de 10%, une correction en fonction du poids volumique du sol (densité en conditions naturelles, non perturbé) est appliquée. Cette densité est bien corrélée avec la teneur en humus normalement connue (Gysi *et al.* 1993). Les facteurs figurent dans le tableau 9, mais ils peuvent aussi être calculés.

4.1 Correction de la fertilisation P et K selon la méthode CO_2

La méthode CO_2 (Dirks et Scheffer 1930), utilisée en Suisse depuis des dizaines années, est adéquate pour déterminer

les teneurs en P et K du sol disponibles pour les plantes. La pertinence des résultats a été établie sur la base de nombreux essais au champ (figures 7 et 8). Dans la plupart des cas, on constate une bonne correspondance entre les teneurs du sol et les rendements ainsi que les teneurs dans les plantes (Peyer 1970; Ryser 1982; Gallet *et al.* 2001).

Dans les sols avec plus de 40% d'argile, et avec une fertilisation renforcée pendant plusieurs années, on constate un développement des cultures et des rendements tout à fait normaux, alors que la méthode CO_2 ne révèle souvent que de faibles teneurs en P et/ou en K. Dans de telles situations, les résultats des analyses de sol ne sont que faiblement liés au bilan entre les quantités d'engrais apportées et les prélèvements par les plantes. Ce phénomène lié à la méthode est pris en considération en intégrant la teneur en argile lors de l'interprétation des résultats.

L'adaptation de la fertilisation au niveau de fertilité de la parcelle selon la méthode CO_2 est l'objet des tableaux 10 et 11, qui contiennent les facteurs de correction pour P et K en fonction des teneurs en ces éléments et en argile du sol. Ces facteurs de correction sont valables pour la majorité des sols du Plateau suisse, des Préalpes et du Jura ayant une teneur en humus inférieure à 10%. Pour les sols affichant plus de 10% d'humus, il faut tenir compte du tableau 9.

Les sols silteux issus de l'altération des schistes des Grisons ainsi que les sols sableux acides du Tessin nécessitent une

Tableau 9. Correction des valeurs analysées pour les sols contenant plus de 10% d'humus.

Cette correction est à faire avant la correction de la fertilisation (tableaux 10 à 18).

Teneur en humus du sol (%)	Poids volumique du sol	Facteur de correction de l'analyse	Teneur en humus du sol (%)	Poids volumique du sol	Facteur de correction de l'analyse
(h)	(d_h) [1]	(f) [1]	(h)	(d_h) [1]	(f) [1]
10,0	1,1005	1,000	25,0	0,7000	0,636
11,0	1,0678	0,970	30,0	0,6020	0,547
12,0	1,0361	0,941	35,0	0,5177	0,470
13,0	1,0053	0,913	40,0	0,4452	0,405
14,0	0,9754	0,886	45,0	0,3829	0,348
15,0	0,9465	0,860	50,0	0,3293	0,299
16,0	0,9183	0,834	…	…	…
17,0	0,8911	0,810			
18,0	0,8646	0,786			
19,0	0,8389	0,762			
20,0	0,8140	0,740			

Calcul du poids volumique:
$d_h = 1{,}488*10^{-0{,}0131*h}$

Calcul de la correction d'après la teneur en humus (f):
$f = d_h/d_{h=10,0}$

[1] Pour les teneurs en humus intermédiaires, il faut faire le calcul.

Exemple: Résultat d'analyse 110,5 pour un sol à 12,0% d'humus
Valeur d'analyse corrigée: 110,5*0,941 = 104,0 ou 110,5*(1,0361/1,1005) = 104,0

Figure 7. Carence en P sur betterave sucrière. A gauche: peuplement lacunaire et petites plantes sur un sol insuffisamment pourvu en P. A droite: peuplement normal, à la même date, sur un sol suffisamment pourvu (photo: René Flisch, Agroscope).

Tableau 10. Facteurs de correction de la fertilisation P selon des teneurs en P (méthode CO_2) et en argile du sol.
(indice P 1,0 = 0,155 mg P/kg de terre)

Pour les teneurs en humus ≥ 10 %, il faut procéder à la correction selon le tableau 9.
Pour les prairies peu intensives, le facteur de correction ne doit pas dépasser 1,0.

Grandes cultures et cultures herbagères

mg P/kg	Indice P	Teneur en argile de la terre fine (%)					Sols spéciaux silteux [1]	Sols spéciaux sableux [2]
		<10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40		
0,000–0,309	**0,0–1,9**	1,5	1,5	1,5	1,4	1,2	1,5	1,4
0,310–0,619	**2,0–3,9**	1,4	1,4	1,3	1,2	1,1	1,5	1,2
0,620–0,930	**4,0–5,9**	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0	1,4	1,0
0,931–1,241	**6,0–7,9**	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8	1,4	1,0
1,242–1,551	**8,0–9,9**	1,0	1,0	1,0	0,8	0,6	1,2	1,0
1,552–1,862	**10,0–11,9**	1,0	1,0	0,8	0,6	0,0	1,2	0,8
1,863–2,172	**12,0–13,9**	1,0	0,8	0,6	0,0	0,0	1,0	0,6
2,173–2,482	**14,0–15,9**	0,8	0,8	0,4	0,0	0,0	1,0	0,4
2,483–2,793	**16,0–17,9**	0,8	0,6	0,0	0,0	0,0	1,0	0,4
2,794–3,103	**18,0–19,9**	0,6	0,4	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0
3,104–3,414	**20,0–21,9**	0,6	0,4	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0
3,415–3,724	**22,0–23,9**	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0
3,725–4,035	**24,0–25,9**	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0
4,036–4,345	**26,0–27,9**	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0
4,346–4,655	**28,0–29,9**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0
≥ 4,656	**≥ 30,0**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

[1] Sols silteux issus de l'altération des schistes des Grisons ayant une teneur en argile <25 % et une teneur en silt >40 %.
[2] Sols sableux et acides du Tessin ayant une teneur en argile <10 %, une teneur en sable >40 % et un pH <5,9.

appréciation particulière pour P. Les facteurs de correction correspondants pour la fertilisation P figurent dans le tableau 10.

4.2 Correction de la fertilisation Mg selon la méthode $CaCl_2$

L'interprétation des résultats d'analyse et les corrections de fertilisation qui en découlent se déroulent comme pour K en relation avec la teneur en argile (tableau 12). Compte tenu des propriétés de la méthode d'extraction (solution d'échange), le niveau de fertilité optimale (facteur de correction 1,0) augmente parallèlement à la teneur en argile.

La détermination du Mg par la méthode $CaCl_2$ est courante dans de nombreux pays d'Europe. Lorsque les résultats d'autres méthodes d'analyse sont difficiles à évaluer, la méthode $CaCl_2$ fournit des résultats précieux étayés par la littérature.

4.3 Correction de la fertilisation P, K et Mg selon la méthode H_2O10

Avec la méthode d'extraction à l'eau (Dirks et Scheffer 1930; Van der Paauw 1956), les échantillons sont soumis à l'extraction avec un rapport de poids de 1:10. Dans l'extrait à l'eau, on mesure les éléments nutritifs immédiatement disponibles pour les plantes; ces valeurs sont proches de celles de la solution de sol. Avec les pH élevés (pH > 7,8), la

Figure 8. Influence du niveau de fertilité du sol sur la croissance des plantes (photo: René Flisch, Agroscope).

Tableau 11. Facteurs de correction de la fertilisation K selon des teneurs en K (méthode CO_2) et en argile du sol.
(Indice K 1,0 = 8,3 mg K/kg de terre)

Pour les teneurs en humus ≥ 10 %, il faut procéder à la correction selon tableau 9.

Pour les prairies intensives et mi-intensives, il est déconseillé d'utiliser un facteur de correction > 1,2 sans analyse préalable du K dans les fourrages. Si la teneur est supérieure à 25 g K/kg de MS, le facteur de correction ne doit pas être > 1,0.

Pour les prairies peu intensives, le facteur de correction ne doit pas dépasser 1,0.

Grandes cultures et cultures herbagères

mg K/kg	Indice K	Teneur en argile de la terre fine (%)				
		< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0,00–4,14	**0,0–0,4**	1,5	1,5	1,4	1,4	1,2
4,15–8,29	**0,5–0,9**	1,5	1,4	1,4	1,2	1,0
8,30–12,44	**1,0–1,4**	1,4	1,4	1,2	1,0	1,0
12,45–16,59	**1,5–1,9**	1,4	1,2	1,0	1,0	1,0
16,60–20,74	**2,0–2,4**	1,2	1,2	1,0	1,0	0,8
20,75–24,89	**2,5–2,9**	1,2	1,0	1,0	0,8	0,6
24,90–29,04	**3,0–3,4**	1,0	1,0	1,0	0,8	0,4
29,05–33,19	**3,5–3,9**	1,0	1,0	0,8	0,6	0,4
33,20–37,34	**4,0–4,4**	1,0	0,8	0,8	0,6	0,0
37,35–41,49	**4,5–4,9**	1,0	0,8	0,6	0,4	0,0
41,50–45,64	**5,0–5,4**	0,8	0,8	0,6	0,4	0,0
45,65–49,79	**5,5–5,9**	0,8	0,6	0,4	0,0	0,0
49,80–53,94	**6,0–6,4**	0,8	0,6	0,4	0,0	0,0
53,95–58,09	**6,5–6,9**	0,6	0,6	0,4	0,0	0,0
58,10–62,24	**7,0–7,4**	0,6	0,4	0,0	0,0	0,0
62,25–66,39	**7,5–7,9**	0,6	0,4	0,0	0,0	0,0
66,40–70,54	**8,0–8,4**	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0
70,55–74,69	**8,5–8,9**	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
74,70–78,84	**9,0–9,4**	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
78,85–82,99	**9,5–9,9**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
≥ 83,00	**≥ 10,0**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

solubilité réduite du P, en particulier s'il y a un excédent de Ca, peut être supérieure à celle qui est révélée par le résultat de la mesure dans l'extrait H_2O10. Pour la détermination du P, cette méthode n'est utilisée que pour les sols ayant un pH situé entre 5,0 et 7,8 (Gysi *et al.* 1993; Gysi *et al.* 1997). Pour les sols avec un pH < 5,0 et > 7,8, il n'existe pas de schéma d'interprétation pour P. Les résultats de ces analyses de sol sont à vérifier par des diagnostics foliaires. Pour ces cas relativement rares en Suisse, il faudrait consulter les spécialistes de la culture à Agroscope.

Jusqu'à présent, la méthode de l'extrait à l'eau n'est pratiquée qu'en cultures spéciales comme les cultures maraîchères, l'arboriculture, la viticulture ainsi que les cultures de petits fruits, plantes médicinales et plantes ornementales. Cette méthode n'a pas encore été étalonnée pour les grandes cultures et les cultures herbagères. La correction de la fertilisation P, K et Mg se fait d'après les tableaux 13 à 15 en tenant compte de la teneur en éléments nutritifs et en argile de la parcelle concernée. Pour les parcelles aux teneurs en humus ≥ 10 %, il faut se référer en plus au tableau 9.

4.4 Correction de la fertilisation P, K et Mg selon la méthode AAE10

De nombreuses investigations sur les processus chimiques en cours durant l'extraction par l'acétate d'ammonium+ EDTA dans un rapport 1:10 (AAE10) (Hons *et al.* 1990; Zbíral 2000) ont montré que ces processus sont différents selon que le sol est pauvre ou riche en carbonates. Cette différence se marque tout particulièrement pour P (Stünzi 2006b; voir aussi chapitre 3.3).

Dans les sols pauvres en carbonates, la faible quantité de Ca^{2+} forme un complexe avec l'EDTA, ce qui évite la formation de phosphate de calcium, le phosphore restant en solution. Si la concentration en Ca^{2+} est très faible, dans les sols acides l'EDTA peut dissoudre du P métallique (fraction de réserve). Cette fraction dépend de la composition minéralogique du sol et, de ce fait, elle ne peut pas être quantifiée dans l'extrait AAE10. Dans l'extraction AAE10 d'une terre riche en carbonates, le $CaCO_3$ est dissous, les ions Ca^{2+} sont fortement excédentaires dans la solution et la capacité d'extraction de l'EDTA pour d'autres éléments est

Tableau 12. Facteur de correction de la fertilisation Mg selon des teneurs en Mg (méthode $CaCl_2$) et en argile du sol.
(Indice Mg 1,0 = 10 mg Mg/kg de terre).

Pour les teneurs en humus ≥ 10 %, il faut procéder à la correction selon le tableau 9.
Pour les prairies peu intensives, le facteur de correction ne doit pas dépasser 1,0.

Grandes cultures et cultures herbagères

mg Mg/kg	Indice Mg	Teneur en argile de la terre fine (%)				
		< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0,0–19,9	**0,0–1,9**	1,4	1,6	1,6	1,6	1,6
20,0–39,9	**2,0–3,9**	1,2	1,4	1,6	1,6	1,6
40,0–59,9	**4,0–5,9**	1,0	1,2	1,4	1,6	1,6
60,0–79,9	**6,0–7,9**	1,0	1,0	1,2	1,4	1,6
80,0–99,9	**8,0–9,9**	0,8	1,0	1,0	1,2	1,4
100,0–119,9	**10,0–11,9**	0,6	0,8	1,0	1,0	1,2
120,0–139,9	**12,0–13,9**	0,4	0,6	1,0	1,0	1,0
140,0–159,9	**14,0–15,9**	0,0	0,4	0,8	1,0	1,0
160,0–179,9	**16,0–17,9**	0,0	0,4	0,6	0,8	1,0
180,0–199,9	**18,0–19,9**	0,0	0,0	0,4	0,6	0,8
200,0–219,9	**20,0–21,9**	0,0	0,0	0,4	0,6	0,6
220,0–239,9	**22,0–23,9**	0,0	0,0	0,0	0,4	0,6
240,0–259,9	**24,0–25,9**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4
260,0–279,9	**26,0–27,9**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4
280,0–299,9	**28,0–29,9**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
≥ 300,0	**≥ 30,0**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tableau 13. Facteurs de correction de la fertilisation P selon le niveau de P dans le sol (mg P/kg de terre, méthode H_2O10) et la teneur en argile du sol.

Si la teneur en humus ≥ 10 %, une correction supplémentaire est à faire selon le tableau 9.
Valable pour les sols au pH situé entre 5,0% et 7,8%.

Légumes, arbres fruitiers, petits fruits, plantes aromatiques et médicinales

P-H_2O10	Teneur en argile de la terre fine (%); pH ≥ 5,0 et ≤ 7,8				
mg P/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0,0–1,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
2,0–3,9	1,5	1,4	1,4	1,2	1,2
4,0–5,9	1,4	1,2	1,2	1,0	1,0
6,0–7,9	1,2	1,0	1,0	0,8	0,8
8,0–9,9	1,2	0,8	0,8	0,4	0,4
10,0–11,9	1,0	0,6	0,6	0,0	0,0
12,0–13,9	0,8	0,4	0,4	0,0	0,0
14,0–15,9	0,8	0,4	0,0	0,0	0,0
16,0–17,9	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0
18,0–19,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
20,0–21,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
22,0–23,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
≥ 24,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Vigne [1]

P-H_2O10	Teneur en argile de la terre fine (%); pH ≥ 5,0 et ≤ 7,8				
mg P/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0,0–1,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
2,0–3,9	1,5	1,4	1,4	1,2	1,2
4,0–5,9	1,4	1,2	1,2	1,0	1,0
6,0–7,9	1,2	1,0	1,0	0,8	0,8
8,0–9,9	1,2	0,8	0,8	0,0	0,0
10,0–11,9	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12,0–13,9	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
≥ 14,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

[1] Les facteurs de correction ont été repris sans modification des Données de base pour la fumure de la vigne (Spring *et al.* 2003).

Tableau 14. Facteurs de correction de la fertilisation K selon le niveau de K dans le sol (mg K/kg de terre, méthode H_2O10) et la teneur en argile du sol.

Si la teneur en humus ≥ 10 %, une correction supplémentaire est à faire selon le tableau 9.

Légumes, arbres fruitiers, petits fruits, plantes aromatiques et médicinales

K-H_2O10	Teneur en argile de la terre fine (%)				
mg K/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0–4,9	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
5,0–9,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
10,0–14,9	1,4	1,4	1,4	1,2	1,2
15,0–19,9	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0
20,0–24,9	1,2	1,2	1,2	0,8	0,8
25,0–29,9	1,0	1,0	1,0	0,6	0,6
30,0–34,9	1,0	1,0	1,0	0,4	0,4
35,0–39,9	1,0	1,0	1,0	0,4	0,4
40,0–44,9	0,8	0,8	0,8	0,0	0,0
45,0–49,9	0,8	0,8	0,8	0,0	0,0
50,0–54,9	0,6	0,6	0,6	0,0	0,0
55,0–59,9	0,6	0,6	0,6	0,0	0,0
60,0–64,9	0,4	0,4	0,4	0,0	0,0
65,0–69,9	0,4	0,4	0,4	0,0	0,0
70,0–74,9	0,4	0,4	0,4	0,0	0,0
≥ 75,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Vigne [1]

K-H_2O10	Teneur en argile de la terre fine (%)				
mg K/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0–4,9	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
5,0–9,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
10,0–14,9	1,4	1,4	1,4	1,2	1,2
15,0–19,9	1,3	1,3	1,3	1,0	1,0
20,0–24,9	1,2	1,2	1,2	0,8	0,8
25,0–29,9	1,1	1,1	1,1	0,0	0,0
30,0–34,9	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0
35,0–39,9	0,9	0,9	0,9	0,0	0,0
40,0–44,9	0,8	0,8	0,8	0,0	0,0
≥ 45,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

[1] Les facteurs de correction ont été repris sans modification des Données de base pour la fumure de la vigne (Spring *et al.* 2003).

Tableau 15. Facteurs de correction de la fertilisation Mg selon le niveau Mg dans le sol (mg Mg/kg de terre, méthode H_2O10) et la teneur en argile du sol.

Si la teneur en humus ≥ 10 %, une correction supplémentaire est à faire selon le tableau 9.

Légumes, arbres fruitiers, petits fruits, plantes aromatiques et médicinales

Mg-H_2O10	Teneur en argile de la terre fine (%)				
mg Mg/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0,0–4,9	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
5,0–9,9	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5
10,0–14,9	1,0	1,2	1,2	1,4	1,4
15,0–19,9	1,0	1,0	1,0	1,2	1,2
20,0–24,9	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0
25,0–29,9	0,4	1,0	1,0	1,0	1,0
30,0–34,9	0,0	0,8	0,8	0,8	0,8
35,0–39,9	0,0	0,6	0,6	0,8	0,8
40,0–44,9	0,0	0,4	0,4	0,6	0,6
45,0–49,9	0,0	0,0	0,4	0,4	0,4
50,0–54,9	0,0	0,0	0,0	0,4	0,4
55,0–59,9	0,0	0,0	0,0	0,4	0,4
≥ 60,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Vigne [1]

Mg-H_2O10	Teneur en argile de la terre fine (%)				
mg Mg/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0,0–4,9	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
5,0–9,9	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5
10,0–14,9	1,1	1,2	1,2	1,4	1,4
15,0–19,9	0,8	1,1	1,1	1,2	1,2
20,0–24,9	0,0	1,0	1,0	1,1	1,1
25,0–29,9	0,0	0,8	0,8	0,9	0,9
30,0–34,9	0,0	0,0	0,0	0,8	0,8
≥ 35,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

[1] Les facteurs de correction ont été repris sans modification des Données de base pour la fumure de la vigne (Spring *et al.* 2003).

perdue (Zimmermann 1997). La teneur en carbonates croissante correspond à une baisse graduelle de la solubilité de P dans l'extrait AAE10 qui peut tomber à 1/20.

Les processus décrits plus haut expliquent le manque de correspondance dans l'interprétation des teneurs en P entre la méthode CO_2 et la méthode AAE10 (Ryser *et al.* 2001; Sinaj *et al.* 2009). La méthode CO_2 a été comparée à la méthode AAE10 dans des essais au champ (figure 9). Dans les sols pauvres en carbonates, les deux méthodes montrent des relations comparables entre les teneurs du sol et le rendement d'une part, et les teneurs du sol et celles dans les plantes d'autre part. Dans les sols acides riches en phosphate de Fe et phosphates d'Al, l'interprétation des teneurs en P de l'extrait AAE10 est incertaine car on ne peut pas savoir quelle quantité de phosphates métalliques a été dissoute. Dans de tels sols, l'extraction AAE10 fournit parfois des résultats non reproductibles. Dans les sols calcaires, la comparaison des teneurs du sol et des réactions des plantes entre les deux méthodes révèlent parfois des similitudes (figure 10) et parfois des disparités. Avec AAE10, les teneurs en P disponible peuvent aussi bien être sous-évaluées que surévaluées. Ne pouvant pas savoir quels processus se dérouleront durant l'extraction AAE10, il faut être conscient qu'en sols riches en carbonates, cette méthode ne fournit pas d'indication fiable sur le niveau de fertilité en P.

Le même constat peut être fait pour Mg, quoi que la base de données soit insuffisante pour une évaluation précise. Des comparaisons avec la méthode classique $CaCl_2$, pratiquée dans de nombreux pays étrangers, révèlent que pour les teneurs en Mg, de grandes divergences par rapport à l'extrait AAE10 sont constatées, précisément en sols calcaires. Ces différences ne peuvent pas être expliquées par la fertilisation appliquée au cours des années précédentes, ni par la structure d'exploitation, ni par les teneurs en Mg dans les plantes. Les différences entre les deux méthodes tiennent particulièrement au fait que la forte concentration en acide acétique dans l'extrait AAE10 est capable de dissoudre de grandes quantités de Mg de la dolomie, tandis que l'extrait $CaCl_2$ procède par un pur échange d'ions.

Figure 9. L'approvisionnement des cultures de racines d'endives en K est déterminant pour obtenir des chicons de bonne qualité. Tant un sol pauvre en K (à gauche) qu'un sol trop riche (à droite) induisent une forte proportion de chicons ouverts, non commercialisables, comparé à un sol normalement pourvu (classe de fertilité C) (photo: René Flisch, Agroscope).

L'adaptation de la fertilisation P, K et Mg aux teneurs en éléments nutritifs spécifiques aux parcelles se fait à l'aide des tableaux 16 à 18. Pour les sols aux teneurs en humus ≥ 10%, il faut prendre en compte les indications du tableau 9.

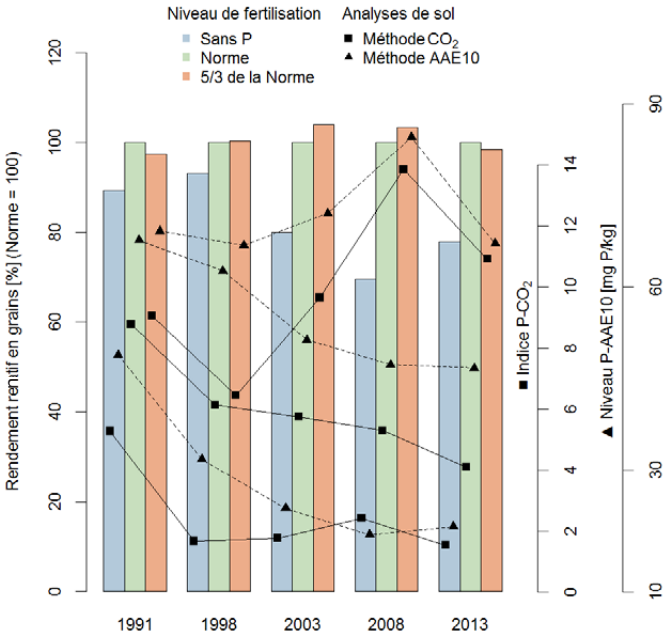

Figure 10. Evolution des teneurs du sol en P (méthodes CO_2 et AAE10) en fonction de différents niveaux de fertilisation P (sans P, norme, 5/3 de la norme) et leur influence sur le rendement du blé dans un essai de longue durée installé en 1989 sur le domaine Agroscope de Zurich-Reckenholz, dans un sol contenant 2% d'humus et 22% d'argile. La fertilisation a été appliquée sous forme minérale dès le début de l'essai (figure: René Flisch, Agroscope)

4.5 Détermination des besoins en engrais P, K et Mg

L'analyse de sol, reflet de l'état de fertilité du sol, est la base pour la détermination de l'exigence d'engrais de P, K et Mg. Elle permet d'adapter la fertilisation afin de stabiliser la fertilité du sol au niveau souhaité (classe de fertilité C). La démarche peut se faire selon la figure 11.

On considère comme prélèvements l'ensemble des éléments nutritifs absorbés, y compris ceux des parties de plante qui peuvent être récoltés. En effet, pour une croissance optimale, il faut nourrir toutes les parties des plantes. Les besoins des racines, qui resteront de toute manière dans le sol, ne sont pas pris en compte. Les valeurs nécessaires à la détermination des besoins en engrais se trouvent dans les modules des cultures sous le titre de Norme de fertilisation.

4.6 Particularités de l'utilisation des engrais P, K et Mg

La capacité des plantes à s'approprier les éléments nutritifs varie d'une espèce à l'autre. Elle dépend de l'étendue

Tableau 16. Facteurs de correction de la fertilisation P selon le niveau P dans le sol (mg P/kg de terre, méthode AAE10) et la teneur en argile du sol pour les sols sans carbonates.
(Test $CaCO_3$ doit être négatif, ou le pH < 6,8 ou le Ca-AAE10 < 4000 mg Ca/kg).

Pour les teneurs en humus ≥ 10 %, il y a lieu de procéder à une correction selon le tableau 9.
Pour les sols carbonatés (test $CaCO_3$ positif, ou le pH ≥ 6,8 ou le Ca-AAE10 ≥ 4000 mg Ca/kg) ces corrections ne sont pas valables pour la fertilisation P.
Pour les prairies peu intensives, le facteur de correction maximal est de 1,0.

Grandes cultures et cultures herbagères					
P-AAE10	Teneur en argile de la terre fine (%); sols non calcaires				
mg P/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0–4,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
5,0–9,9	1,5	1,5	1,4	1,4	1,2
10,0–14,9	1,5	1,4	1,4	1,2	1,2
15,0–19,9	1,4	1,4	1,2	1,2	1,2
20,0–24,9	1,4	1,2	1,2	1,2	1,0
25,0–29,9	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0
30,0–34,9	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0
35,0–39,9	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0
40,0–44,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
45,0–49,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
50,0–54,9	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8
55,0–59,9	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8
60,0–64,9	1,0	1,0	0,8	0,8	0,8
65,0–69,9	1,0	0,8	0,8	0,8	0,6
70,0–74,9	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6
75,0–79,9	0,8	0,8	0,6	0,6	0,6
80,0–84,9	0,8	0,6	0,6	0,6	0,4
85,0–89,9	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4
90,0–94,9	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4
95,0–99,9	0,6	0,4	0,4	0,4	0,0
100,0–104,9	0,4	0,4	0,4	0,0	0,0
105,0–109,9	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0
110,0–114,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
115,0–119,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
120,0–124,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
≥ 125,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Légumes, arbres fruitiers, petits fruits, plantes aromatiques et médicinales					
P-AAE10	Teneur en argile de la terre fine (%); sols non calcaires				
mg P/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0–4,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
5,0–9,9	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4
10,0–14,9	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4
15,0–19,9	1,5	1,4	1,4	1,4	1,2
20,0–24,9	1,4	1,4	1,4	1,2	1,2
25,0–29,9	1,4	1,4	1,2	1,2	1,2
30,0–34,9	1,4	1,2	1,2	1,2	1,2
35,0–39,9	1,4	1,2	1,2	1,2	1,0
40,0–44,9	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0
45,0–49,9	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0
50,0–54,9	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0
55,0–59,9	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0
60,0–64,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
65,0–69,9	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8
70,0–74,9	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8
75,0–79,9	1,0	1,0	0,8	0,8	0,8
80,0–84,9	1,0	0,8	0,8	0,8	0,8
85,0–89,9	1,0	0,8	0,8	0,8	0,4
90,0–94,9	0,8	0,8	0,8	0,4	0,4
95,0–99,9	0,8	0,8	0,4	0,4	0,4
100,0–104,9	0,8	0,4	0,4	0,4	0,0
105,0–109,9	0,4	0,4	0,4	0,0	0,0
110,0–114,9	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0
115,0–119,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
120,0–124,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
≥ 125,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Vigne [1]					
P-AAE10	Teneur en argile de la terre fine (%); sols non calcaires				
mg P/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0–4,9	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
5,0–9,9	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
10,0–14,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
15,0–19,9	1,5	1,5	1,5	1,3	1,3
20,0–24,9	1,5	1,4	1,4	1,2	1,2
25,0–29,9	1,5	1,4	1,4	1,0	1,0
30,0–34,9	1,5	1,3	1,3	0,9	0,9
35,0–39,9	1,5	1,3	1,3	0,8	0,8
40,0–44,9	1,4	1,2	1,2	0,0	0,0
45,0–49,9	1,4	1,1	1,1	0,0	0,0
50,0–54,9	1,4	1,0	1,0	0,0	0,0
55,0–59,9	1,4	1,0	1,0	0,0	0,0
60,0–64,9	1,3	0,9	0,9	0,0	0,0
65,0–69,9	1,3	0,9	0,9	0,0	0,0
70,0–74,9	1,3	0,8	0,8	0,0	0,0
75,0–79,9	1,3	0,8	0,8	0,0	0,0
80,0–84,9	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0
85,0–89,9	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0
90,0–94,9	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
95,0–99,9	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
100,0–104,9	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0
105,0–109,9	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0
110,0–114,9	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
115,0–119,9	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
120,0–124,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
≥ 125,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

[1] Les facteurs de correction ont été repris sans modification des Données de base pour la fumure de la vigne (Spring *et al.* 2003).

Tableau 17. Facteurs de correction de la fertilisation K selon le niveau K dans le sol (mg K/kg de terre, méthode AAE10) et la teneur en argile du sol.

Pour les teneurs en humus ≥ 10 %, il y a lieu de procéder à une correction selon le tableau 9.

Pour les prairies de longue durée intensives et mi-intensives, pas de correction supérieure à 1,2 sans analyse préalable du K dans le fourrage. Pour les teneurs en K dans le fourrage > 25 g K/kg de matière sèche, facteur de correction maximum 1,0.

Pour les prairies peu intensives, le facteur de correction ne doit pas dépasser 1,0.

Grandes cultures et cultures herbagères

K-AAE10	Teneur en argile de la terre fine (%)				
mg K/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0–19,9	1,5	1,5	1,4	1,4	1,2
20–39,9	1,5	1,4	1,4	1,4	1,2
40–59,9	1,4	1,4	1,3	1,2	1,0
60–79,9	1,4	1,2	1,2	1,2	1,0
80–99,9	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0
100–119,9	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0
120–139,9	1,2	1,0	1,0	1,0	0,8
140–159,9	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8
160–179,9	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8
180–199,9	1,0	1,0	0,8	0,8	0,6
200–219,9	1,0	0,8	0,8	0,8	0,6
220–239,9	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6
240–259,9	0,8	0,8	0,6	0,6	0,4
260–279,9	0,8	0,6	0,6	0,6	0,4
280–299,9	0,6	0,6	0,6	0,4	0,0
300–319,9	0,6	0,6	0,4	0,4	0,0
320–339,9	0,6	0,4	0,4	0,0	0,0
340–359,9	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0
360–379,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
380–399,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
400–419,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
≥ 420	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Légumes, arbres fruitiers, petits fruits, plantes aromatiques et médicinales

K-AAE10	Teneur en argile de la terre fine (%)				
mg K/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0–19,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,2
20–39,9	1,5	1,4	1,4	1,4	1,2
40–59,9	1,4	1,4	1,4	1,2	1,2
60–79,9	1,4	1,2	1,2	1,2	1,0
80–99,9	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0
100–119,9	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0
120–139,9	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0
140–159,9	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8
160–179,9	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8
180–199,9	1,0	1,0	0,8	0,8	0,8
200–219,9	1,0	0,8	0,8	0,8	0,8
220–239,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
240–259,9	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6
260–279,9	0,8	0,6	0,6	0,6	0,6
280–299,9	0,8	0,6	0,6	0,4	0,4
300–319,9	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4
320–339,9	0,6	0,4	0,4	0,4	0,0
340–359,9	0,6	0,4	0,4	0,0	0,0
360–379,9	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0
380–399,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
400–419,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
≥ 420	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Vigne

K-AAE10	Teneur en argile de la terre fine (%)				
mg K/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0–19,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
20–39,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
40–59,9	1,5	1,4	1,4	1,2	1,2
60–79,9	1,5	1,4	1,4	1,2	1,2
80–99,9	1,4	1,2	1,2	1,0	1,0
100–119,9	1,4	1,2	1,2	1,0	1,0
120–139,9	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0
140–159,9	1,2	1,0	1,0	0,8	0,8
160–179,9	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8
180–199,9	1,0	0,8	0,8	0,8	0,8
200–219,9	1,0	0,8	0,8	0,0	0,0
220–239,9	0,8	0,8	0,8	0,0	0,0
240–259,9	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
260–279,9	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
280–299,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
300–319,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
320–339,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
340–359,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
360–379,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
380–399,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
400–419,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
≥ 420	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tableau 18. Facteurs de correction de la fertilisation Mg selon le niveau Mg dans le sol (mg Mg/kg de terre, méthode AAE10) et la teneur en argile du sol sans carbonates.
(Test $CaCO_3$ doit être négatif, ou le pH < 6,8 ou le Ca-AAE10 < 4000 mg Ca/kg).

Pour les teneurs en humus ≥ 10 %, il faut procéder à la correction selon le tableau 9.
En sols calcaires (test $CaCO_3$ positif, pH ≥ 6,8, ou Ca-AAE10 ≥ 4000 mg Ca/kg), le facteur de correction n'est pas valable.
En prairies peu intensives, le facteur de correction ne doit pas être supérieur à 1,0.

Grandes cultures et cultures herbagères					
Mg-AAE10	Teneur en argile de la terre fine (%); sols non calcaires				
mg Mg/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0–24,9	1,2	1,2	1,4	1,5	1,5
25–49,9	1,2	1,2	1,4	1,4	1,5
50–74,9	1,2	1,2	1,4	1,4	1,4
75–99,9	1,0	1,2	1,2	1,2	1,4
100–124,9	1,0	1,0	1,2	1,2	1,4
125–149,9	0,8	1,0	1,0	1,2	1,2
150–174,9	0,8	1,0	1,0	1,0	1,2
175–199,9	0,4	0,8	1,0	1,0	1,2
200–224,9	0,4	0,8	0,8	1,0	1,0
225–249,9	0,4	0,6	0,8	1,0	1,0
250–274,9	0,0	0,6	0,6	0,8	1,0
275–299,9	0,0	0,4	0,6	0,8	1,0
300–324,9	0,0	0,0	0,4	0,6	0,8
325–349,9	0,0	0,0	0,4	0,6	0,8
350–374,9	0,0	0,0	0,0	0,4	0,6
375–399,9	0,0	0,0	0,0	0,4	0,6
400–424,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4
425–449,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
≥ 450	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Légumes, arbres fruitiers, petits fruits, plantes aromatiques et médicinales					
Mg-AAE10	Teneur en argile de la terre fine (%); sols non calcaires				
mg Mg/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0–24,9	1,2	1,4	1,4	1,5	1,5
25–49,9	1,2	1,4	1,4	1,5	1,5
50–74,9	1,2	1,2	1,4	1,4	1,5
75–99,9	1,0	1,2	1,2	1,4	1,4
100–124,9	1,0	1,2	1,2	1,2	1,4
125–149,9	1,0	1,0	1,2	1,2	1,4
150–174,9	0,8	1,0	1,0	1,2	1,2
175–199,9	0,6	1,0	1,0	1,0	1,2
200–224,9	0,6	0,8	1,0	1,0	1,2
225–249,9	0,4	0,8	0,8	1,0	1,0
250–274,9	0,4	0,6	0,8	1,0	1,0
275–299,9	0,4	0,6	0,8	0,8	1,0
300–324,9	0,4	0,4	0,6	0,8	1,0
325–349,9	0,0	0,4	0,6	0,6	0,8
350–374,9	0,0	0,4	0,4	0,6	0,8
375–399,9	0,0	0,0	0,4	0,4	0,6
400–424,9	0,0	0,0	0,0	0,4	0,6
425–449,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4
≥ 450	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Vigne [1]					
Mg-AAE10	Teneur en argile de la terre fine (%); sols non calcaires				
mg Mg/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0–24,9	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
25–49,9	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5
50–74,9	1,2	1,5	1,5	1,5	1,5
75–99,9	1,0	1,4	1,4	1,5	1,5
100–124,9	0,8	1,3	1,3	1,4	1,4
125–149,9	0,0	1,1	1,2	1,3	1,4
150–174,9	0,0	0,9	1,0	1,3	1,3
175–199,9	0,0	0,8	0,9	1,2	1,3
200–224,9	0,0	0,0	0,8	1,1	1,2
225–249,9	0,0	0,0	0,0	1,0	1,1
250–274,9	0,0	0,0	0,0	0,9	1,0
275–299,9	0,0	0,0	0,0	0,8	0,9
300–324,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
325–349,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
350–374,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
375–399,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
400–424,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
425–449,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
≥ 450	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

[1] Les facteurs de correction ont été repris sans modification des Données de base pour la fumure de la vigne (Spring *et al.* 2003).

Besoins en engrais	=	Norme de fertilisation de la culture [1]	*	Facteur de correction
(kg P/ha, kg K/ha, kg Mg/ha)		(kg P/ha, kg K/ha, kg Mg/ha)		(selon chapitres 4.1 à 4.4)
Couverts par: - résidus de récolte - engrais de ferme - engrais de recyclage - engrais minéraux		Correspond au total des prélèvements calculés à partir du rendement de la culture (corrigé en fonction de l'objectif de rendement du site) et de la teneur de la plante en éléments nutritifs (sans les racines qui restent en terre), corrigés selon les spécificités de la culture. (Voir module des groupes de cultures)		Correction en vue du maintien ou de l'atteinte du niveau de fertilité souhaité (classe de fertilité C). Elle est dépendante: - de la méthode d'analyse - du groupe de cultures

[1] La norme de fertilisation est l'objet des modules de cultures.

Figure 11. Schéma de calcul des besoins en engrais pour P, K et Mg.

Figure 12. Jeunes plantes de maïs. A gauche, sur sol carencé en P, on observe une coloration violette des feuilles et un retard de végétation; à droite, pour comparaison, à la même date, des plantes normalement alimentées en sol classé au niveau de fertilité C (photo: René Flisch, Agroscope).

du système racinaire. La teneur optimale en éléments nutritifs dans le sol est en étroite corrélation avec les concentrations correspondantes dans la solution de sol et par conséquent différente d'une espèce à l'autre.

La **teneur optimale du sol** en P, K et Mg a été définie pour des plantes à capacité d'appropriation moyenne des éléments nutritifs. Pour les cultures concernées, la fertilisation correspond aux prélèvements. A ce sujet, les céréales d'automne et les graminées, avec leur fin et vaste système racinaire, ont une bonne capacité d'absorption des éléments nutritifs. C'est aussi une qualité des plantes-racines comme la betterave, dont les racines pénètrent profondément dans le sol, lui permettant de prélever une grande partie du K dans les couches profondes. Dans de tels cas, la fertilisation en sol normalement pourvu (classe de fertilité C) peut être inférieure aux prélèvements sans inconvénient. En revanche, les espèces à faible développement racinaire (p. ex. les pommes de terre et certains légumes) ont besoin d'une plus forte concentration dans la solution du sol. Pour que leurs besoins en éléments nutritifs puissent être couverts, il faut temporairement renforcer l'offre; ce supplément doit être pris en compte dans le plan de fumure des cultures suivantes.

Les engrais minéraux P sont généralement épandus avant le travail du sol principal ou avant la préparation du lit de semences. Quant à la forme du P, les renseignements se trouvent au chapitre 4.2.2 du module 4.

Pour éviter **la consommation de luxe de K** par quelques plantes fourragères, qui entraîne en général une réduction de l'absorption du magnésium, les apports de potassium minéral de plus de 200 kg K_2O/ha doivent être fractionnés en deux fois (par exemple au départ de la végétation, puis après la seconde utilisation). Dans les grandes cultures et les cultures maraîchères, les apports de K sous forme minérale doivent se limiter à 300 kg K_2O/ha afin

Figure 13. Carence en K sur pomme de terre. Les taches jaunes finissent par des nécroses sur le bord des feuilles les plus vieilles (photo: René Flisch, Agroscope).

d'éviter d'éventuels dégâts d'excès de sel sur les plantes sensibles et/ou un excès de K dans les plantes. Pour des quantités supérieures, un apport partiel sous forme d'engrais de ferme ou sur la culture intercalaire est indiqué. En sols sableux, procéder à l'épandage de K en fin d'hiver ou tôt au printemps, afin d'éviter le transfert de quantités non négligeables de K à une profondeur où les racines ne pourront plus en profiter. Il importe de choisir les engrais minéraux d'après leur composition et leurs propriétés, particulièrement ceux qui sont destinés à des cultures sensibles au chlore (chapitre 4.2, module 4).

Mg est relativement mobile dans le sol. Il est important d'observer ce qui suit afin d'éviter **des pertes de Mg par lessivage**: les engrais magnésiens solubles (sulfate de Mg) sont à épandre peu avant la phase de développement intense des cultures, tout comme pour les engrais azotés. Pour améliorer le niveau de fertilité du sol en Mg à long terme, il faut apporter tout ou partie du Mg sous une forme moins soluble comme par exemple l'oxyde de Mg (MgO) ou le carbonate de Mg ($MgCO_3$), la dolomie par exemple (chapitre 4.2.4, module 4).

Dans les exploitations avec des sols très riches et avec production d'engrais de ferme, les quantités d'éléments nutritifs produits peuvent dépasser largement les besoins des cultures. En principe, dans de telles situations, il faut exporter les quantités d'éléments nutritifs excédentaires. Une exportation conséquente, en particulier si le niveau de fertilité du sol est très élevé en P par exemple, peut entraîner un déficit d'un autre élément (N par exemple). Dans de telles situations, il faut trouver un compromis acceptable au plan agronomique et écologique entre la répartition des engrais de ferme dans l'exploitation et les exportations. Avec un facteur de correction de 0,8 (80% des besoins des plantes) et un affourragement exclusivement avec les produits de l'exploitation, le seuil ne devrait pas être dépassé. En revanche, si une partie de l'affourragement est constituée de fourrages achetés (concentrés inclus), on aboutit obligatoirement à un bilan excédentaire; par conséquent, les éléments nutritifs en trop doivent être exportés par des engrais de ferme.

Le système d'information HOFDULU, dont le principe est ancré dans la législation sur l'agriculture (OFAG 2012), facilite la gestion des échanges d'engrais de ferme entre exploitations.

4.7 Autres éléments nutritifs et micro-éléments

4.7.1 Azote

La mesure de l'azote minéral contenu dans le sol (N_{min}) est un moyen d'optimiser la fertilisation azotée, en particulier dans les grandes cultures et les cultures maraîchères. La prise en compte du N_{min} par rapport au stade de développement des plantes est décrite dans les modules spécifiques aux groupes de cultures. La méthode N_{min} peut aussi être utile à la résolution de problèmes écologiques, par exemple pour évaluer les quantités de N_{min} qui subsistent dans le sol en automne et celles susceptibles d'être lessivées. Cette méthode n'est en revanche pas adéquate pour vérifier après l'apport d'engrais ou après la récolte si les doses de N appliquées étaient adéquates.

4.7.2 Soufre

Le passage aux huiles de chauffage pauvres en S dans toute l'Europe de l'ouest a entraîné une baisse sensible des quantités de S dans l'atmosphère. Jusque dans les années 1980, les immissions de S atmosphérique (30–50 kg S/ha) suffisaient à couvrir une grande part des besoins des plantes, même celles qui en requièrent beaucoup. Selon diverses sources d'information, la quantité de S apportée annuellement par les pluies se situe actuellement en dessous de 10 kg S/ha dans de nombreuses régions.

La matière organique est actuellement la principale ressource naturelle de S. Les résidus de récolte, les engrais de ferme et les engrais de recyclage apportent au sol du S lié à la matière organique.

De nos jours, il n'est pas rare d'observer des carences en S sur des plantes aux besoins importants en cet élément, comme le colza, différentes sortes de choux, les légumineuses et des liliacées comme les oignons et les poireaux. Ceci malgré la présence de S dans les réserves du sol, mais celui-ci doit être préalablement minéralisé pour être libéré de la matière organique et ainsi devenir disponible pour les plantes. Cette minéralisation se déroule parallèlement à celle du N. Il en résulte du sulfate (SO_4^{2-}) qui se comporte comme le nitrate dans le sol où il est tout autant exposé au lessivage.

Le stade critique de l'approvisionnement en S des cultures qui en requièrent beaucoup a lieu principalement au printemps. Dans les régions aux quantités de précipitations élevées, comme c'est le cas dans la plus grande partie de la Suisse, les reliquats de S disponible encore présents dans le sol en automne migrent dans les profondeurs où ils ne se-

Figure 14. Carence en S sur choux-raves (fertilisation sans S au centre de la photo). L'utilisation d'engrais P, K et Mg avec sulfates contribue à prévenir des carences en S (photo: Hanspeter Buser, Agroscope).

ront plus atteignables par les racines de la culture suivante. A la reprise de la végétation au printemps, la minéralisation du S présent dans la matière organique est retardée à cause des températures basses du sol.

Si l'on fait abstraction des sols pauvres en humus, les carences en S en été jusqu'au début d'automne sont plutôt rares, même sur les plantes exigeantes, grâce à une température du sol plus élevée, favorable à une libération continue du S par minéralisation. En périodes de fortes précipitations et juste après, il peut y avoir un manque de disponibilités temporaire.

Différents essais de fertilisation ont montré qu'une carence en S (figure 14) peut être compensée efficacement par des apports de P, K et Mg sous forme de sulfates (superphosphate, phosphate de potassium, Patentkali, etc.). Des apports de N sous forme de sulfate d'ammonium sont aussi efficaces.

La plante prélève le S sous forme de sulfate. On serait tenté de mesurer le sulfate dans l'extrait des échantillons N_{min}. Le résultat est défini par la valeur S_{min}. Selon des expériences récoltées en Allemagne, l'interprétation de cette valeur est cependant nettement moins fiable que les valeurs N_{min}.

La quantité potentielle de S disponible peut être évaluée avec suffisamment de précision en combinant l'impact de différents paramètres relatifs au site et au mode d'exploitation. Parmi ces paramètres basiques, il y a la teneur du sol en humus, en argile et en squelette, ainsi que la profondeur utile du sol, les précipitations de l'hiver et du printemps, la fréquence des épandages d'engrais de ferme et les quantités d'engrais N appliquées (tableau 19). Le besoin

Tableau 19. Critères pour évaluer la quantité de S disponible dans le sol à l'aide d'une échelle à points.

Critères	Importance du critère	Influence sur le S disponible (points)
Teneur du sol en humus (%)	< 2	1
	2–5	3
	> 5	5
Teneur du sol en argile (%)	< 10	1
	10–20	2
	20–30	3
	> 30	5
Squelette du sol (% volume)	> 30	1
	10–30	3
	< 10	5
Profondeur de sol utile (cm)	10–30	1
	31–70	5
	> 70	7
Précipitations d'octobre (de l'année précédente) à mars (mm)	> 540	1
	370–540	3
	< 370	5
Utilisation d'engrais de ferme	jamais	1
	moins d'une fois en 3 ans	3
	au moins une fois en 3 ans	5
Ecart entre la fertilisation azotée épandue et la quantité prévue [1]	supplément > 40 kg N/ha	1
	variation +/–40 kg N/ha	3
	réduction > 40 kg N/ha	5

[1] Fertilisation N déterminée selon la méthode par estimation ou selon la méthode N_{min} (voir les modules des cultures).

Tableau 20. Facteurs de correction de la fertilisation S d'après les disponibilités dans le sol et les prélèvements par la culture.

Besoins de la culture en S [1]	Nombre de points pour le S disponible dans le sol (tableau 19)	Facteur de correction pour le besoin en S de la culture [1]
Cultures très exigeantes: > 60 kg S/ha		
Colza, légumineuses, diverses espèces de choux, céleri	< 15	0,75
	15–23	0,50
	> 23	0,25 [2]
Cultures moyennement exigeantes: 25 à 60 kg S/ha		
Céréales, betteraves fourragères et sucrières, maïs, pois, haricots, cultures herbagères, asperges, oignons	< 14	0,70
	14–20	0,50
	> 20	0
Cultures peu exigeantes: < 25 kg S/ha		
Pommes de terre, diverses espèces de salade	< 13	0,5
	13–18	0
	> 18	0

[1] Les prélèvements (besoins) en S des cultures figurent dans les modules des cultures ou peuvent être obtenus auprès des spécialistes concernés d'Agroscope.

[2] Seulement au cas où des engrais organiques contenant du S (p.ex. engrais de ferme) sont épandus moins d'une fois tous les trois ans.

Tableau 21. Dosage de la fertilisation B et Mn selon les résultats des analyses de sol, les propriétés du sol et les besoins des cultures (méthodes d'analyse: voir tableau 6).

Elément nutritif	Teneur du sol (mg/kg)		Appréciation	Classe de fertilité	Teneur en humus < 10 %		Teneur en humus ≥ 10 %			
							Sols acides et faiblement acides		Sols neutres et alcalins	
					Cultures peu exigeantes	Cultures exigeantes [1]	Cultures peu exigeantes	Cultures exigeantes [1]	Cultures peu exigeantes	Cultures exigeantes [1]
Bore (B)	< 0,6		pauvre	A	1,5–2,0 kg B/ha*	2,5–3,0 kg B/ha*	1,5–2,0 kg B/ha*	2,5–3,0 kg B/ha*	1,5–2,0 kg B/ha*	2,5–3,0 kg B/ha*
	0,6–1,5		médiocre	B	–	1,5–2,0 kg B/ha*	–	2,0–2,5 kg B/ha*	–	2,0–2,5 kg B/ha*
	1,6–2,0		satisfaisant	C	–	1,0 kg B/ha*		1,0 kg B/ha*		1,0 kg B/ha*
	2,1–5,0		riche	D	–	–	–	–	–	–
	> 5,0		très riche	E	–	–	–	–	–	–
Manganèse (Mn)	Echangeable	Légèrement réductible								
	< 2		pauvre	A	20–40 kg Mn/ha*	30–50 kg Mn/ha*	30–50 kg Mn/ha*	40–60 kg Mn/ha*	10–15 kg/ha sulfate de manganèse [2]	
	> 2	< 50	médiocre	B	20–40 kg Mn/ha*	20–40 kg Mn/ha*	20–40 kg Mn/ha*	20–40 kg Mn/ha*	10–15 kg/ha sulfate de manganèse [2]	
	> 2	> 50	satisfaisant	C	–	–	–	–	–	–

[1] B: betteraves, colza, tournesol, céleri, vigne, fruits à pépins, fruits à noyau; Mn: céréales, légumineuses, épinards, betteraves, fruits à pépins, fruits à noyau.

[2] Une fertilisation du sol est généralement sans effet en de telles conditions > fertilisation foliaire (600 à 1'000 l d'eau). Souvent, il faut répéter les applications au même dosage. Il n'y a pas que le sulfate de Mn qui entre en ligne de compte pour les applications foliaires (bien observer les prescriptions d'utilisation et les doses d'emploi).

* fertilisation du sol: B peut être épandu sous forme de borax ou appliqué par pulvérisation (au sol). Il peut être aussi épandu dans un engrais complet à condition que la dose soit suffisante.

en engrais S peut être défini à partir des besoins en S de la culture (voir les modules des cultures) et de la quantité estimée de S disponible dans le sol (tableau 20; Pellet *et al.* 2003a et 2003b).

4.7.3 Micro-éléments (éléments traces)

En cas de rendements élevés, en sols particuliers et selon les conditions d'exploitation, il peut arriver que des micro-éléments soient insuffisants. Dans des cas exceptionnels (cultures exigeantes, risques de carence élevés), il peut être nécessaire de déterminer les teneurs en B et Mn disponibles dans le sol.

Les micro-éléments sont absorbés en faibles quantités comparativement aux éléments principaux (macro-éléments). Les besoins des plantes varient beaucoup d'un élément trace à l'autre. Les quantités exportées atteignent jusqu'à 1 kg/ha pour Fe, en première position, suivi de Mn, B, Zn et Mo qui sont absorbés par la plupart des plantes à raison de seulement quelques grammes par ha. Ces valeurs ne sont toutefois que des ordres de grandeur, les valeurs effectives variant beaucoup d'une espèce à l'autre.

Figure 15. La carence en B (p. ex. après un chaulage excessif) entraîne la pourriture du cœur de la betterave (photo: René Flisch, Agroscope).

De par leur nature, les sols sableux et les sols tourbeux contiennent peu de micro-éléments. La plupart des autres terres cultivables en contiennent généralement en suffisance. Cependant, un pH peu favorable, un compactage du sol ou une période sèche peuvent réduire sensiblement la solubilité dans le sol et la disponibilité de ces éléments pour les plantes.

La disponibilité des micro-éléments peut être améliorée par un travail du sol soigné, une irrigation adaptée et un entretien adéquat du pH par une fertilisation ciblée. Un choix de la forme des engrais ainsi qu'un chaulage dirigé permettent de stabiliser le pH autant que possible à une valeur optimale (chapitre 5).

En cas de carence temporaire, l'application de micro-éléments se fait principalement par voie foliaire. Cependant, la marge entre la carence et l'excès en matière des micro-éléments est très étroite. Une application inopportune peut conduire à un excès dommageable pour des plantes sensibles.

Les sols sableux irrigués, les sols très alcalins ou très acides ainsi que les sols riches en humus peuvent être le site de carences en B et Mn par lessivage ou immobilisation. Beaucoup des engrais complets utilisés contiennent du B. Sans cet apport, il y a risque de carence (figure 15).

Dans quelques cas, une fertilisation avec du B ou du Mn peut s'avérer indispensable. Pour les cultures exigeantes en B (betterave, colza, tournesol, vigne), des apports d'un ordre de grandeur de 1,5 à 2 kg B/ha sont recommandés. A relever que des chaulages inopportuns peuvent perturber sérieusement l'absorption de B et Mn par les cultures. Le tableau 21 renseigne sur l'interprétation des résultats d'analyses de sol pour définir la nécessité d'apports ciblés de B ou Mn en tenant compte de la teneur en humus, du pH et des besoins des cultures.

Hormis B et Mn, une fertilisation contenant des micro-éléments ne se justifie qu'en conditions de sol et de production très particulières. Des analyses de sol sur d'autres micro-éléments sont exceptionnelles et devraient être discutées avec un service de vulgarisation ou Agroscope.

Une technique adéquate permet un dosage exact et la distribution uniforme des amendements calciques (photo: Peter Briner AG).

5. Chaulage

L'état calcique du sol est un facteur important pour l'utilisation agricole durable du terrain. Cet état est fortement influencé par la roche-mère (à partir de laquelle le sol s'est formé), la pluviométrie et le système d'exploitation, ainsi que divers processus qui se déroulent dans le sol et qui influencent aussi la croissance des plantes (chapitre 2.4).

Les pertes en chaux sont principalement dues au lessivage, au besoin de neutralisation du sol et au prélèvement de Ca par les cultures. Les pertes annuelles peuvent atteindre plusieurs centaines de kg de CaO_3 par hectare. Ces pertes peuvent généralement être compensées par des apports d'engrais de ferme, de recyclage ou du commerce contenant de la chaux, ou par de petits apports sporadiques de chaux (chaulage d'entretien). Pour améliorer le niveau calcique de sols plus ou moins acides (chaulage de correction), il faut procéder à un chaulage adéquat. L'importance et la fréquence des chaulages dépendent du pH, de la saturation en bases et du type de sol. A noter que le chaulage élève le pH du sol et peut ainsi modifier la disponibilité des éléments nutritifs.

Les engrais calciques sont des substances à action alcalinisante, faisant baisser la concentration en ions hydrogène (H^+) et monter le pH ainsi que la sorption des ions Ca^{2+} et Mg^{2+}. Ces réactions sont le fait des oxydes de Ca (CaO), des hydroxydes de Ca ($Ca(OH)_2$), ainsi que des carbonates de Ca ($CaCO_3$) ou de Mg ($MgCO_3$). Selon les usages internationaux, les quantités des amendements basiques calciques sont libellées dans la forme oxyde de Ca (CaO). L'effet neutralisant est dû à $CaCO_3$ ou à la molécule d'hydroxyde de Ca [$Ca(OH)_2$] qui se forme dans le sol à partir du CaO.

Formules de l'effet neutralisant des amendements basiques calciques:

$$CaCO_3 + 2\ H^+ \rightarrow Ca^{2+} + CO_2 + H_2O$$

$$CaO + H_2O + 2\ H^+ \rightarrow Ca(OH)_2 + 2\ H^+ \rightarrow Ca^{2+} + H_2O$$

Le gypse ($CaSO_4 \cdot 2\ H_2O$) n'est pas considéré comme engrais à effet chaulant car il ne modifie pas le pH du sol; ce n'est qu'un engrais calcique et sulfaté.

5.1 Détermination des apports de chaux sur la base du pH

Lorsque l'état calcique du sol doit être amélioré, une évaluation grossière de l'amendement nécessaire peut être effectuée en se basant sur le $pH_{(H2O)}$ du sol (tableau 22). Il faut tenir compte du fait que les besoins en amendement basique calcique augmentent avec le taux d'argile du sol et diminuent avec le taux d'humus.

Pour apprécier les besoins en chaulage d'entretien, il peut être utile d'évaluer l'effet des engrais minéraux utilisés sur l'état calcique du sol, de même que le besoin des cultures.

L'effet théorique (E) acidifiant ou alcalin d'un engrais, exprimé en équivalent CaO, peut être calculé avec la formule de Sluijsmans (1970):

E (kg CaO)	=	$1{,}0 \times CaO + 1{,}4 \times MgO + 0{,}6 \times K_2O + 0{,}9 \times Na_2O - 0{,}4 \times P_2O_5 - 0{,}7 \times SO_3 - 0{,}8 \times Cl - n \times N$
(n = 0,8 pour les prairies et 1,0 pour les terres ouvertes)		

Un E positif indique un effet alcalin et un E négatif un effet acidifiant.

Tableau 22. Estimation grossière des apports de chaux d'après le pH et la teneur en argile du sol ainsi que l'utilisation du sol.

Teneurs en argile et en humus	$pH_{(H_2O)}$ du sol	Chaulage de correction [1] dt CaO/ha		Chaulage d'entretien dt CaO/ha tous les 4–5 ans	Chaulage d'entretien dt CaO par ha et année
		Grandes cultures Légumes de plein champ Vignes Vergers	Prairies permanentes	Prairies permanentes	Vergers
< 10 % argile	< 5,3	20	10	–	2,5–3,0
	5,3–5,8	15	7,5 [2]	5–7 [3]	1,0–2,5
	5,9–6,2	10	5 [2]	5–7 [3]	0,5–1,0
	> 6,2	0	0	–	0–0,75
10–20 % argile	< 5,3	25	12,5	–	3,0–4,0
	5,3–5,8	20	10	6–9 [3]	1,5–2,5
	5,9–6,2	15	7,5	6–9 [3]	0,75–1,25
	> 6,2	0	0	–	0–1,0
20–30 % argile	< 5,3	30	15	–	3,5–4,25
	5,3–5,8	25	12,5 [2]	8–10 [3]	2,5–3,5
	5,9–6,2	20	10 [2]	8–10 [3]	1,0–1,5
	> 6,2	0	0	–	0–1,25
> 30 % argile	< 5,3	35	20	–	5–6
	5,3–5,8	30	17,5 [2]	9–12 [2]	2–5
	5,9–6,7	25	15 [2]	9–12 [2]	1–2
	> 6,7	0	0	–	0–1,5
≥ 10 % humus		0	0	–	–

[1] En production herbagère, il faut tenir compte de la composition botanique et des espèces végétales adaptées aux conditions du milieu.
En cultures fruitières, on ne tient plus compte de la teneur en Ca dans l'extrait AAE10 pour le chaulage (Bertschinger *et al.* 2003). Le but du chaulage est la modification du pH (ions H^+) et non la teneur en Ca du sol.

[2] En général, un chaulage d'entretien tous les quatre à cinq ans est suffisant.

[3] Un chaulage d'entretien est recommandé si une acidification progressive du sol est observée.

5.2 Détermination des apports de chaux sur la base de la capacité d'échange des cations et de la saturation en bases

Les colloïdes argileux et la matière organique adsorbent les cations de la solution de sol à leur surface qui est chargée négativement. Si la concentration des cations vient à baisser dans la solution du sol, les complexes argilo-humique cèdent de nouveau des éléments nutritifs à la solution du sol, où ils peuvent être absorbés par les racines.

La saturation en bases (SB) indique le pourcent des places, d'après la capacité d'échange des cations (CEC), qui sont occupées avec des cations (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Na^+). Plus la SB est basse, plus grande est la concentration en ions hydrogènes dans la solution du sol, donc l'acidité du sol, ce qui est déterminant pour définir le besoin en chaux du sol.

Pour définir les apports de chaux de manière ciblée, la CEC et la SB constituent la base de la décision. L'estimation de l'état calcique du sol selon ces deux paramètres et selon l'utilisation du sol est l'objet des tableaux 23 et 24 (Walther *et al.* 1987; Collaud *et al.* 1990). Pour les prairies permanentes, si la SB est inférieure à 50%, un chaulage peut s'avérer nécessaire. Pour les autres cultures, cette valeur se situe vers 60%.

5.3 Indications particulières pour le chaulage

5.3.1 Grandes cultures

La plage de pH optimal pour les espèces de grande culture est relativement large, allant d'acide à faiblement alcalin. Si un chaulage est nécessaire, il est préférable de le placer dans la rotation avant une culture qui préfère un sol alcalin ou qui supporte des apports de chaux. Il est préférable d'épandre plus fréquemment des doses réduites pour éviter le risque d'immobiliser des micro-éléments ou de provoquer un «choc calcique» sur les cultures sensibles.

Des apports de chaux ciblés sur certaines cultures dans des sols au pH supérieur à 6,2 comportent quelques risques; ils doivent être réservés à des situations exceptionnelles et ne pas dépasser 10–15 dt CaO/ha. Ce genre d'apport est à éviter en

particulier dans les rotations avec pomme de terre afin d'éviter des baisses de rendement importantes sur cette culture, même sans qu'on y voie des symptômes de carence en cours de végétation.

5.3.2 Herbages

Pour les herbages, les valeurs optimales de pH du sol sont en général inférieures aux valeurs optimales pour les grandes cultures. La majorité des bonnes plantes fourragères se plaisent dans des sols faiblement acides à acides ($pH_{(H_2O)}$ 5,5–6,7). Dans cette plage de pH, la plupart des éléments nutritifs sont bien disponibles pour les plantes. Bien que le processus soit lent, les sols ont cependant tendance à progressivement s'acidifier, à un rythme dépendant des conditions du milieu et du type de fertilisation. Ceci est également vrai pour les sols utilisés pour la culture herbagère (Jeangros et Troxler 2008) et le pH du sol doit donc aussi être régulièrement contrôlé pour ce type d'utilisation. Lorsque le pH du sol descend au-dessous de 5,5 (6,5 pour la luzerne), la croissance des légumineuses diminue, ainsi que les quantités de N atmosphérique fixées par leurs racines, ce qui peut provoquer une baisse de rendement. Pour contrebalancer cette acidification naturelle, il est recommandé d'utiliser régulièrement des engrais N, P et/ou Mg à action alcalinisante ou de procéder à de légers chaulages d'entretien (tableau 22).

Lorsque le pH du sol est inférieur à environ 5,5 et que la composition botanique de la prairie n'est pas optimale (p. ex. trop peu de légumineuses), il est nécessaire d'envisager un amendement ciblé en tenant compte du degré de saturation en bases (tableau 24). Dans ces conditions, la correction du pH peut avoir un effet positif sur la proportion de légumineuses ou de bonnes plantes fourragères. Des apports de chaux supérieurs à 15 dt CaO/ha doivent cependant être fractionnés en plusieurs apports espacés de deux ans. La teneur en Ca du fourrage ne permet pas d'apprécier l'état calcique du sol ni les besoins en amendement basique calcique, car elle dépend fortement de la composition botanique de la prairie.

En cultures herbagères, il n'est pas recommandé d'apporter un amendement basique calcique (chaulage de correction) si le pH est supérieur à 5,5, ni s'il est inférieur mais que la composition botanique est équilibrée. Différentes séries d'essais n'ont que rarement montré un effet positif du chaulage sur le rendement des prairies en pH supérieur à 5,5 (Schechtner 1993; Fabre et Kockmann 2006; Huguenin-Elie *et al.* 2015). Des apports de chaux trop élevés provoquent même une altération de la disponibilité des éléments nutritifs (à partir d'un pH supérieur à environ 7,0).

Avant de décider d'un chaulage de correction, il est conseillé d'évaluer le bénéfice pouvant être escompté en fonction de la situation:

- Dans les régions au climat rude, où la croissance des graminées supportant une utilisation intensive est réduite, la production herbagère est fortement limitée par la température, les précipitations et/ou la durée de la période de végétation. Dans ces conditions, les graminées dominant la composition botanique des herbages doivent être utilisées de manière moins intensive et donnent un rendement plus faible. Le rendement de l'herbage est donc moins fortement influencé par l'état calcique du sol.

- Une composition botanique dégradée à la suite d'erreurs de gestion (fertilisation trop élevée, utilisation trop intensive, compaction du sol, etc.) ne peut pas être corrigée par des amendements basiques calciques. Pour les prairies permanentes utilisées intensivement et croissant sur des sols acides à faiblement acides, le chaulage ne permet pas à lui seul de faire reculer les populations de re-

Tableau 23. Evaluation de l'état calcique du sol selon la saturation en bases (SB).

SB (%)			Qualification de l'état calcique du sol	Classement
Terres assolées	Prairies permanentes	Vignes Cultures fruitières		
< 40	< 30	< 40	très pauvre	A
40–49	30–39	40–49	pauvre	A
50–59	40–49	50–59	médiocre	B
60–79	50–79	60–79	satisfaisant	C
≥ 80	≥ 80	≥ 80	riche	D

Tableau 24. Détermination d'amendement basique calcique à appliquer en fonction de la saturation en bases (SB) et de la capacité d'échange des cations du sol.

Les doses sont calculées pour une profondeur de 0–20 cm. Pour l'amendement basique calcique des couches plus profondes (par exemple pour une nouvelle plantation d'arbres fruitiers ou de vigne) les quantités doivent être adaptées en conséquence.
Les facteurs de conversion des différentes formes d'amendement basique calcique se trouvent dans le tableau 14 du module 4.

SB (%)			Apport de CaO (dt/ha) selon la capacité d'échange des cations (cmol+/100 g de terre) [1]			
Terres assolées	Prairies permanentes	Vignes Vergers	< 10	10–14,9	15–19,9	≥ 20
≥ 60	≥ 50	≥ 60	0	0	0	0
50–59	40–49	50–59	7,3	12,5	15,5	20,0 [2]
40–49	30–39	40–49	10,0	19,0	21,5 [2]	28,0 [2]
< 40	< 30	< 40	13,0	24,5 [2]	27,5 [2]	36,0 [2]

[1] Antérieurement, à la place de cmol+/100 g on utilisait l'unité méq/100 g. Les valeurs finales restent les mêmes.

[2] Fractionner en 2–3 apports espacés de 2–4 ans. Avant chaque nouvel apport, une analyse du pH du sol est recommandée.

noncules âcres ou rampantes qui s'y seraient établies (Huguenin-Elie *et al.*, 2015).

5.3.3 Cultures maraîchères, cultures de baies annuelles, plantes aromatiques et médicinales

Le niveau de fertilité du sol en P et en micro-éléments est important pour ce groupe de cultures. Généralement, la disponibilité de ces éléments nutritifs est optimale lorsque le pH est situé entre 6,0 et 7,0 (figure 2).

Dans les sols alcalins, une part élevée du P est immobilisée sous la forme peu soluble de phosphates de Ca. Une augmentation du pH entraîne une diminution de la disponibilité de Fe, Mn, B Zn et Cu; en revanche, elle augmente celle du Mo. Une acidification du sol augmente nettement la solubilité de Mn et Al, ce qui peut faire apparaître des symptômes de phytotoxicité, tout particulièrement en sols détrempés, notamment sur les légumes sensibles comme les salades par exemple (Neuweiler 2011).

Un chaulage d'entretien à doses réduites, réalisé avant la mise en place d'une culture intercalaire ou avant l'installation d'une espèce alcalinophile comme le chou, permet d'éviter des risques sur les cultures sensibles à cause de l'élévation momentanée du pH.

Selon les espèces de baies, de plantes aromatiques ou médicinales, les exigences concernant le pH et l'état calcique du sol sont différentes, surtout si l'on vise un rendement et une qualité satisfaisants (Carlen 2007). Le choix d'un site adéquat est plus sensé que la correction d'un pH.

5.3.4 Viticulture

Pour la vigne, un chaulage est recommandé lorsque le pH est inférieur à 5,9. Entre 5,9 et 6,5, un chaulage peut être envisagé mais, bien souvent, il suffit d'utiliser des formulations d'engrais calciques pour la fertilisation annuelle (chaulages d'entretien). Cette seconde solution est aussi valable pour des valeurs de pH entre 6,5 et 7,0, en particulier si les mesures de pH périodiques montrent une tendance à la baisse. De nombreux sols viticoles au nord des Alpes ont un pH supérieur à 7,0 pour lesquels il n'est pas recommandé d'utiliser des engrais calciques ni de chauler.

En cas de replantation, il peut être opportun de procéder à un chaulage de l'horizon inférieur. Cette opération peut requérir d'importantes quantités de chaux, pour lesquelles une mouture grossière est préférable. La chaux doit être incorporée à au moins 30–40 cm de profondeur en mettant à profit la phase de replantation; ceci permet d'éviter des déséquilibres nutritionnels dans les centimètres supérieurs une fois que la nouvelle culture est en place. Si un apport de chaux important est justifié, il faut le limiter à 20 dt de CaO par ha, moulu très grossièrement, et l'échelonner sur deux à quatre ans et l'incorporer au sol.

Le chaulage peut être exécuté sur la base des indications du pH, ce qui est relativement peu précis mais simple (tableau 22). Le choix de la forme d'amendement ou d'engrais est le même que celui qui est décrit plus haut.

Il est nécessaire de connaître l'état calcique du sol pour bien choisir le porte-greffe, car la tolérance des porte-greffes au calcaire peut beaucoup varier. A l'étranger, on recourt souvent à la détermination du calcaire actif dans l'argile et le silt en lieu et place du calcaire total.

5.3.5 Arboriculture

En arboriculture, un pH entre 6,0 et 7,5 est idéal. Le pH du sol est important car il influence l'activité biologique et la disponibilité de la plupart des éléments nutritifs. Une élévation du pH peut être réalisée par chaulage, tandis qu'un abaissement, bien plus difficile, peut être favorisé par du mulchage ou l'utilisation conséquente d'engrais à action acidifiante.

Les doses annuelles de chaux indiquées dans le tableau 22 correspondent à des apports d'entretien. Pour un amendement calcique, il faut des quantités nettement plus importantes qui doivent être calculées d'après la saturation des bases et la capacité d'échange des cations. Dans ce cas, le recours à un expert est recommandé.

Etant donné qu'un chaulage peut influencer négativement la disponibilité de certains micro-éléments ou être la cause d'antagonisme par rapport à d'autres éléments nutritifs, la nécessité d'une telle mesure doit être bien évaluée dans chaque situation. Il faut en tout cas éviter un apport excessif.

5.3.6 Cultures de baies

Pour la plupart des cultures de baies, un pH entre 6,0 et 7,5 est idéal. Avec un pH plus élevé, il y a des risques de chlorose à cause d'une absorption insuffisante de Fe et Mn. Les myrtilles font toutefois exception, ayant besoin d'un sol avec un pH de 4–5 et riche en matière organique. Les myrtilles peuvent aussi être cultivées avec un pH de 6,0–6,5, pour autant que le sol ne contienne pas de carbonates. Mis à part le Tessin, de tels sols sont rares en Suisse. Au cas où le pH d'un sol ne conviendrait pas à la culture de myrtilles, un amendement adéquat serait très coûteux.

6. Fertilité du sol et gestion de l'humus

6.1 Le concept de fertilité du sol

Le maintien, voire l'amélioration de la fertilité du sol, est un objectif important de la fertilisation. Ce chapitre traite particulièrement du rapport entre la fertilisation et la fertilité du sol ainsi que la gestion de l'humus. La base de l'appréciation de la fertilité des sols est définie dans la législation suisse (OSol 1998). Un sol est considéré comme fertile:

- s'il présente, pour sa station, une biocénose biologiquement active, une structure, une succession et une épaisseur typiques, et qu'il dispose d'une capacité de décomposition intacte;
- s'il permet aux plantes et aux associations végétales naturelles ou cultivées de croître et de se développer normalement et ne nuit pas à leurs propriétés;

- si les fourrages et les denrées végétales qu'il fournit sont de bonne qualité et ne menacent pas la santé de l'homme et des animaux;
- si son ingestion ou inhalation ne menace pas la santé de l'homme et des animaux.

Le domaine d'application de cette définition est vaste et ne couvre pas uniquement les sols cultivés mais aussi les sols des biotopes naturels.

Pour apprécier la fertilité du sol, on procède généralement à une appréciation de ses diverses fonctions. En résumé, un sol est considéré comme fertile si ses fonctions correspondent aux conditions du site.

6.2 Fonctions et propriétés des sols

Dans le concept sol pour l'agriculture suisse (Candinas *et al.* 2002), qui expose les bases d'appréciation d'une utilisation durable du sol, autant les fonctions du sol que ses propriétés y sont décrites.

Abstraction faite de la diversité du paysage et des terrains bâtis, les fonctions du sol (réservoir d'eau, de chaleur et d'éléments, effets de filtre, puits de CO_2, etc.) sont couplées à une ou plusieurs propriétés chimiques, physiques et biologiques. Des modifications de l'une ou l'autre de ces propriétés peuvent influencer directement ou indirectement les fonctions du sol à des degrés divers. Pour cette raison, la connaissance des relations entre propriétés et fonctions est à la base de tous les travaux visant au maintien voire à l'amélioration de la qualité du sol. Les importantes fonctions du sol en relation avec la fertilisation, comme les cycles et la décomposition des substances ainsi que la production de biomasse sont conditionnées par la plupart des propriétés du sol. A côté des propriétés physiques telles que la structure du sol et la stabilité des agrégats, la quantité et la qualité de la matière organique (plus simplement: la teneur en humus) influencent la plupart des fonctions. Alors que les propriétés physiques du sol ne peuvent être influencées qu'indirectement par la fertilisation, celle-ci influence directement la teneur en matière organique de différentes manières, parfois très directement. La matière organique du sol n'influence pas que la capacité de rétention des éléments nutritifs et les échanges de substances, mais constitue elle-même un pool d'éléments nutritifs – N en particulier – qui est mis à disposition des plantes par la minéralisation. L'effet azoté de la matière organique est pris en compte dans le tableau 3 ainsi que dans les modules des cultures. Les chapitres suivants sont axés sur les facteurs importants pour l'entretien et l'amélioration des teneurs en matière organique.

6.3 Entretien de la teneur en humus à long terme – aide à la décision et mesures adéquates

6.3.1 Contrôle de la teneur en humus par des mesures régulières

Pour apprécier l'effet des mesures d'exploitation sur la teneur en humus, les prescriptions des PER pour les terres assolées prévoient une mesure régulière de la teneur en humus, au moins tous les 10 ans (pour les cultures spéciales, c'est selon les prescriptions des organisations). Dans les essais de longue durée conduits en Suisse, des différences relatives entre procédés culturaux (hors témoins sans engrais) ont été observées, pouvant atteindre 20%. Sur la base de mesures annuelles en parcelles d'essai, ces différences sont statistiquement significatives. Si les mesures avaient été faites tous les cinq ans, ces différences n'auraient pas été statistiquement significatives, même après 20 ans. De plus, la variabilité parfois élevée des sols altère la fiabilité des résultats obtenus sur des échantillons censés être représentatifs des parcelles dont ils sont issus. De ce fait, la fréquence prescrite pour les analyses de sol fournit certes une indication utile pour l'agriculteur, mais insuffisante pour mesurer l'effet réel des techniques culturales sur l'évolution des teneurs en humus dans un délai permettant des corrections.

6.3.2 Evaluation de l'influence du mode d'exploitation par le biais du bilan humique

Dans le but d'évaluer, indépendamment des analyses, comment la rotation des cultures et le mode d'exploitation peuvent influencer la teneur en matière organique à long terme (figure 16), différentes méthodes d'évaluation plus ou moins laborieuses (bilan humique) ont été développées.

En Suisse, en 1997, une méthode de calcul du bilan humique a déjà été publiée (Neyroud *et al.* 1997); elle a été développée pour évaluer la qualité du sol dans les écobilans (Oberholzer *et al.* 2006) qui ne nécessitent que peu d'informations facilement disponibles sur l'exploitation et les propriétés de base du sol. Dans cette méthode, l'effet des facteurs sol et la gestion du sol sur la décomposition et la reconstitution de l'humus sont évalués pour chaque parcelle. C'est un bilan parcellaire des gains et pertes d'humus prévisibles. Concrètement, l'estimation des pertes en humus par minéralisation tient compte des propriétés du sol et de l'intensité du travail du sol, tandis que l'évaluation des gains est déterminée par des résidus de récolte sur et dans le sol, ainsi que par la nature et la quantité des apports d'engrais organiques.

L'établissement périodique d'un bilan humique de l'exploitation dans la perspective du maintien de la teneur en humus des sols est une tâche vivement recommandée à accomplir à intervalles réguliers, surtout si des modifications du mode d'exploitation sont intervenues. Au cas où les modifications du mode d'exploitation planifiées conduiraient à un bilan négatif, soit une évolution défavorable de la teneur en humus, on peut réévaluer les effets d'une amélioration des mesures à planifier en calculant un bilan prospectif.

6.3.3 Résultats et recommandations

Pour une appréciation générale de l'évolution de l'humus, on peut tirer parti des résultats des bilans humiques calculés sur 300 exploitations dans le cadre du monitoring agro-environnemental suisse. Ces bilans révèlent des différences

significatives entre types d'exploitations. Les exploitations de grande culture sans bétail ont généralement un bilan humique déficitaire; en revanche, dans les exploitations de grande culture avec bétail, les bilans sont systématiquement positifs. L'explication des bilans négatifs se trouve essentiellement au niveau de la rotation des cultures, avec une forte part de cultures sarclées et peu de prairies temporaires. Dans ces cas, il y a moins de carbone souterrain stocké par les cultures et le travail du sol plus intensif stimule la dégradation de l'humus (minéralisation). De plus, les apports d'engrais organiques sont généralement plus faibles dans les exploitations de grande culture, et ce déficit n'est pas compensé par des apports plus grands de résidus de récolte (paille, engrais verts). On peut tirer quelques conclusions de ces considérations:

- L'entretien d'une teneur en humus suffisante en rapport avec le site est réalisé par une quantité suffisante de matière organique morte capable d'améliorer différentes propriétés du sol, directement ou après formation de complexes organo-humiques. Cet objectif est généralement au centre des préoccupations. Tout aussi importante est l'intégration des substances organiques (exsudats racinaires durant la période de végétation des cultures inclus) capable de fournir énergie et substances nutritives aux organismes vivants du sol, afin qu'ils puissent développer leur action.
- Avec un certain mode d'exploitation, dans un site défini par le climat et les propriétés de son sol, il s'installe une teneur en humus typique. Celle-ci est déterminée par les processus propres à l'humus, c'est-à-dire sa décomposition et sa reconstitution par les apports de matière organique provenant d'engrais et de résidus de récolte.
- La teneur en humus d'un sol est déterminée dans une large mesure par la rotation des cultures adaptée au type d'exploitation, et par les propriétés de ce sol. Les exploitations avec bétail cultivent généralement une bonne part de la rotation en prairie temporaire et les animaux fournissent suffisamment d'engrais de ferme.
- Le choix des cultures détermine la quantité de matière organique qui retourne au sol par les racines et les résidus de récolte. Dans les grandes cultures, prairies temporaires mises à part, le maïs grain et le tournesol laissent beaucoup de matière organique sur le sol par les feuilles et les tiges; en revanche, la betterave sucrière et les pommes de terre laissent peu de chose car leurs feuilles se décomposent très facilement. Les céréales (paille récoltée) et le colza occupent une position intermédiaire.

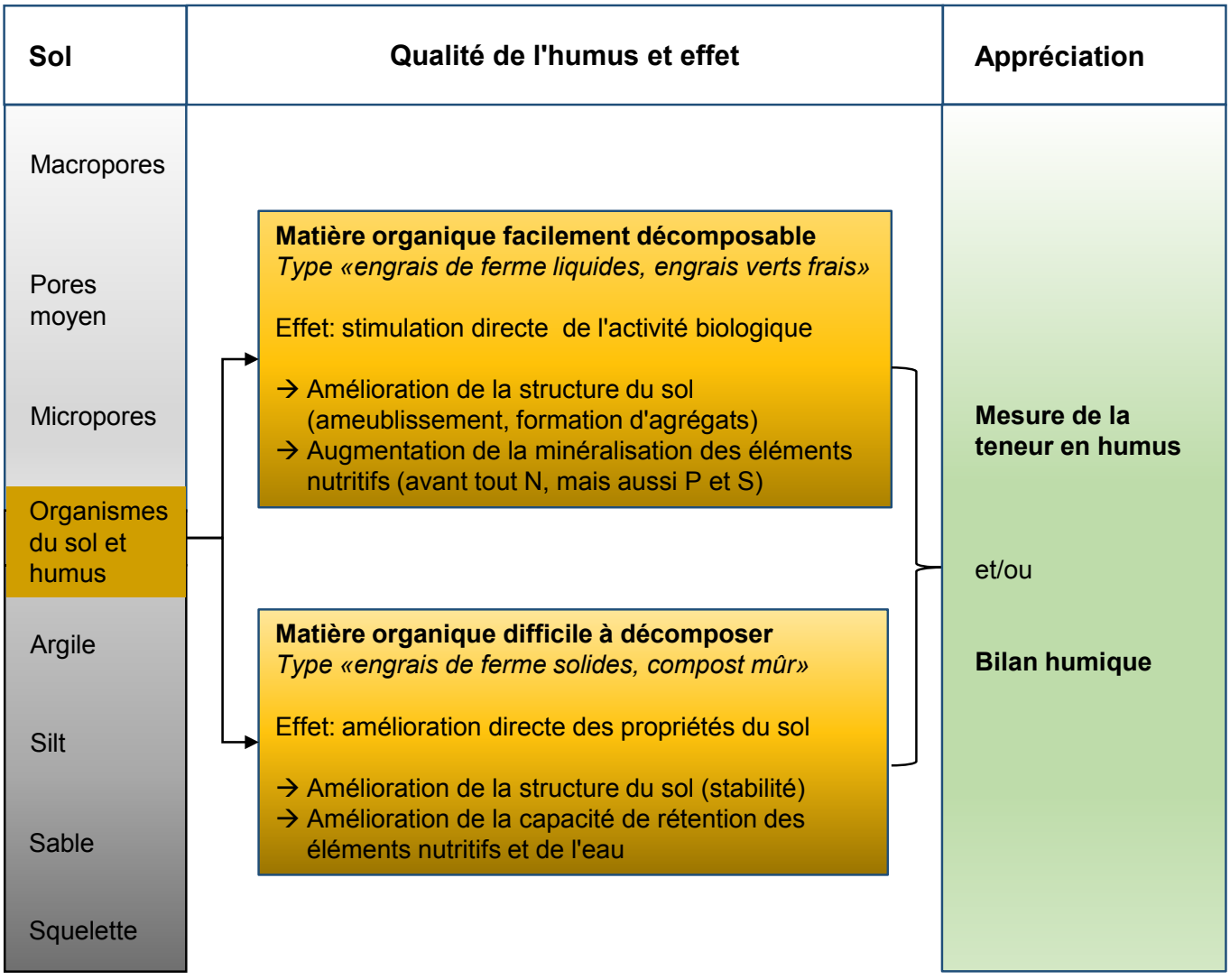

Figure 16. Effets des apports de diverses substances organiques sur la teneur en humus et sur sa qualité.

Les cultures intercalaires ont de fait un effet positif sur le pool humique en termes d'apports de matière.

- Parmi les mesures d'exploitation, le travail du sol est le facteur le plus influent. Le travail du sol aère la terre par l'augmentation du volume des pores. En même temps, des matières organiques sont incorporées, ramenées à la surface ou redistribuées. Ces deux processus font que la matière organique est plus facilement accessible pour les organismes du sol et sa décomposition est d'autant plus intense. L'intensité du travail du sol est déterminée en partie par la culture à mettre en place. Ainsi, les pommes de terre ne peuvent être ni plantées ni récoltées sans un brassage important.

- De la matière organique peut être fournie au sol sous forme d'engrais de ferme et d'engrais de recyclage comme le compost (figure 16). La composition et la qualité de ces engrais déterminera la quantité de matière organique qui sera décomposée à court terme en éléments nutritifs disponibles pour les plantes, et la part qui sera plus difficile à décomposer et restera ainsi plus longtemps dans le sol. En principe, les engrais organiques solides contribuent davantage à la formation d'humus que les liquides, et le compost ou le fumier composté «faits» augmentent davantage la teneur en humus que les engrais organiques frais.

7. Bibliographie

Agroscope, 1996. Méthodes de référence des stations de recherche Agroscope, volume 1: Analyse de terre et du substrat pour conseil de fumure. Edition 2015. Agroscope, Zurich.

Bertschinger L., Gysi Ch., Häseli A., Neuweiler R., Pfammatter W., Ryser J.-P., Schmid A. & Weibel F., 2003. Grundlagen für die Düngung der Obstkulturen, Flugschrift Nr. 15. Forschungsanstalt Agroscope Changins-Wädenswil FAW, Wädenswil.

Candinas T., Neyroud J.-A., Oberholzer H.-R. & Weisskopf P., 2002. Ein Bodenkonzept für die Landwirtschaft in der Schweiz: Grundlagen für die Beurteilung der nachhaltigen landwirtschaftlichen Bodennutzung. Bodenschutz 3/02, 90–98.

Carlen Ch. & Carron C.-A., 2007. Grundlagen für die Düngung der Gewürz- und Medizinalpflanzen. Agrarforschung 14 (1), 1–8.

Collaud G., Ryser J.-P. & Schwarz J.-J., 1990. Capacité d'échange des cations. Revue suisse d'agriculture 22 (5), 285–289.

Demaria P., Flisch R., Frossard E. & Sinaj S., 2005. Exchangeability of phosphate extracted by four chemical methods. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 68, 89–93.

Dirks B. & Scheffer H., 1930. Der Kohlensäure-Bikarbonatauszug und der Wasserauszug als Grundlage zur Ermittlung der Phosphorsäurebedürftigkeit der Böden. Landwirtschaftliche Jahrbücher 71, 73–99.

Fabre B. & Kockmann F., 2006. Les effets du chaulage sur les prairies permanentes ou de longue durée. Synthèse bibliographique. Fourrages 185, 103–122.

Frossard E., Julien P., Neyroud J.-A. & Sinaj S., 2004. Le phosphore dans les sols – État de la situation en Suisse. Cahier de l'environnement N° 368. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne. 174 p.

Gysi Ch., Ryser J.-P., Heller W. & Arbeitsgruppe Bodenuntersuchungen in Spezialkulturen, 1993. Flugschrift 129. Eidg. Forschungsanstalt für Obst-, Wein- und Gartenbau, Wädenswil. 18 p.

Gysi Ch., Ryser J.-P. & Heller W., 1997. Bodenuntersuchung im Gemüsebau. Flugschrift Nr. 112, 2. Auflage, Eidg. Forschungsanstalt für Obst-, Wein- und Gartenbau, Wädenswil, 24 p.

Hons F. M., Larson-Vollmer L. A. & Locke M. A., 1990. NH_40Ac-EDTA-extractable phosphorus as a soil test procedure. Soil Science 149 (5), 249–256.

Huguenin-Elie O., Stutz C. J., Gago R. & Lüscher A., 2015. Wirkung der Kalkdüngung auf mit Hahnenfuss verunkrauteten Wiesen. Tagungsband der 59. Jahrestagung der AGGF in Aulendorf, S. 110–113. Hrsg. Landwirtschaftliches Zentrum Baden-Württemberg für Rinderhaltung, Grünlandwirtschaft, Milchwirtschaft, Wild und Fischerei (LAZBW), Aulendorf.

Jeangros B. & Troxler J., 2008. Effet à long terme d'une gestion différenciée sur les prairies et les pâturages d'une exploitation de montagne. Revue suisse d'Agriculture 40 (3), 123–130.

Neuweiler R., 2011. Düngungsrichtlinien für den Gemüsebau. Forschungsanstalt Agroscope Changins-Wädenswil ACW, Wädenswil. 29 p.

Neyroud J.-A., Supcik P. & Magnollay F., 1997. La part du sol dans la production intégrée. 1. Gestion de la matiére organique et bilan humique. Revue suisse d'Agriculture 29, 45–51.

Oberholzer H.-R., Weisskopf P., Gaillard G., Weiss F. & Freiermuth Knuchel R., 2006. Methode zur Beurteilung der Wirkungen landwirtschaftlicher Bewirtschaftung auf die Bodenqualität in Ökobilanzen. Agroscope, Zurich.

OFAG, 2012. HODUFLU –Gestion des flux d'engrais de ferme. Office fédéral de l'agriculture, Berne. Accès: https://www.agate.ch/portal/web/agate/hofdungerflusse [11.10. 2016].

Pellet D., Mercier E., Balestra U., Lavanchy J.C., Pfeifer H.R., Keiser A. & Bezençon N., 2003a. Optimisation de la fumure soufrée par estimation du risque de carence. I. Colza d'automne. Revue suisse d'Agriculture 35, 161–167.

Pellet D., Mercier E. & Balestra U., 2003b. Optimisation de la fumure soufrée par estimation du risque de carence. II. Blé d'automne. Revue suisse d'Agriculture 35 (4), 181–186.

Peyer K., 1970. Phosphatversorgung der Pflanzen und Kennwerte des Bodenphosphats, untersucht an einigen Böden der Schweiz. ETH Diss. Nr. 4501, Zürich. Accès: http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-000085418 [14.10. 2016].

Ryser J.-P., 1982. Etude du potassium assimilable pour les cultures sur quelques sols du canton de Vaud. ETH Diss. Nr. 7095, Zürich. Accès: http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-000278617 [14.10. 2016].

Ryser J-P., Walther U., & Flisch R., 2001. Données de base pour la fumure des gandes cultures et des herbages. Revue suisse d'Agriculture 33 (3), 80.

Schroeder D., 1984. Bodenkunde in Stichworten. 4. Auflage. Verlag Ferdinand Hirt, Unterägeri. 160 p.

Schechtner G., 1993. Wirksamkeit der Kalkdüngung auf Grünland. Die Bodenkultur 44 (2), 135–152.

Sinaj S., Richner W., Flisch R. & Charles R., 2009. Données de base pour la fumure des gandes cultures et des herbages. Revue suisse d'Agriculture 41 (1), 98.

Spring J., Ryser J., Schwarz J., Basler P., Bertschinger L & Häseli A., 2003. Données de base pour la fumure en viticulture. Revue suisse de viticulture arboriculture horticulture. 35, (4), 2003, 1–1.

SSP, 2010. Classification des sols de Suisse, Edition 3, Société Suisse de Pédologie, Luzern. 92 p.

Stünzi H., 2006a. Die P-Bodenextraktionsmethoden mit Wasser und CO_2-Wasser. Agrarforschung 13 (7), 284–289.

Stünzi H., 2006b. Zur P-Bodenextraktion mit Ammoniumacetat-EDTA (AAE10). Agrarforschung 13 (11–12), 488–493.

OSol, 1998. Ordonnance sur les atteintes portées aux sols du 1er juillet 1998. Recueil systématique du droit fédéral, RS 814.12, Berne.

Van der Paauw F., 1956. Calibration of soil test methods for the determination of phosphate and potash status. Plant and Soil 8, 105–125.

Walther U., Ryser J.-P., Flisch R. & Siegenthaler A., 1987. Düngungsrichtlinien für den Acker- und Futterbau. Eidg. Forschungsanstalten FAP, Zurich, FAC, Berne, & RAC, Changins.

Zbíral J., 2000. Determination of phosphorus in calcareous soils by Mehlich, CAL and Egner extractants. Communications in Soil Science and Plant Analysis 31(19/20), 3037–3048.

Zimmermann K.S., 1997. Wirkung einer gepufferten Ammonium-Acetat-EDTA-Extraktion auf ausgewählte Bodenbestandteile und natürliche Bodenproben. ETH Diss Nr. 12134, Zurich. Accès: http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-001763309 [14.10.2016].

8. Liste des tableaux

Tableau 1. Relation entre classes de teneur en argile (parts d'argile) et les propriétés des sols. 2/4

Tableau 2. Classification pédologique des teneurs en humus (SSP 2010). 2/4

Tableau 3. Interprétation agronomique de la teneur en humus du sol pour une appréciation du potentiel de fourniture de N par le sol. 2/4

Tableau 4. Appréciation du pH du sol et du besoin en chaux. 2/5

Tableau 5. Recommandations pour la prise d'échantillons de terre pour différents groupes de cultures agricoles. 2/7

Tableau 6. Principales méthodes d'analyse de sol utilisées par Agroscope pour optimaliser la fertilisation des cultures agricoles. 2/8

Tableau 7. Choix de la méthode d'analyse de base pour différents groupes de cultures. 2/9

Tableau 8. Appréciation de l'état de fertilité des sols basée sur les facteurs de correction définis dans les tableaux 10 à 18. ..... 2/10

Tableau 9. Correction des valeurs analysées pour les sols contenant plus de 10% d'humus. 2/11

Tableau 10. Facteurs de correction de la fertilisation P selon des teneurs en P (méthode CO_2) et en argile du sol. 2/12

Tableau 11. Facteurs de correction de la fertilisation K selon des teneurs en K (méthode CO_2) et en argile du sol. 2/13

Tableau 12. Facteur de correction de la fertilisation Mg selon des teneurs en Mg (méthode $CaCl_2$) et en argile du sol. 2/14

Tableau 13. Facteurs de correction de la fertilisation P selon le niveau de P dans le sol (mg P/kg de terre, méthode H_2O10) et la teneur en argile du sol. 2/14

Tableau 14. Facteurs de correction de la fertilisation K selon le niveau de K dans le sol (mg K/kg de terre, méthode H_2O10) et la teneur en argile du sol. 2/15

Tableau 15. Facteurs de correction de la fertilisation Mg selon le niveau Mg dans le sol (mg Mg/kg de terre, méthode H_2O10) et la teneur en argile du sol. 2/15

Tableau 16. Facteurs de correction de la fertilisation P selon le niveau P dans le sol (mg P/kg de terre, méthode AAE10) et la teneur en argile du sol pour les sols sans carbonates. 2/17

Tableau 17. Facteurs de correction de la fertilisation K selon le niveau K dans le sol (mg K/kg de terre, méthode AAE10) et la teneur en argile du sol. 2/18

Tableau 18. Facteurs de correction de la fertilisation Mg selon le niveau Mg dans le sol (mg Mg/kg de terre, méthode AAE10) et la teneur en argile du sol pour les sols sans carbonates. 2/19

Tableau 19. Critères pour évaluer la quantité de S disponible dans le sol à l'aide d'une échelle à points. ... 2/22

Tableau 20. Facteurs de correction de la fertilisation S d'après les disponibilités dans le sol et les prélèvements par la culture. 2/22

Tableau 21. Dosage de la fertilisation B et Mn selon les résultats des analyses de sol, les propriétés du sol et les besoins des cultures. 2/23

Tableau 22. Estimation grossière des apports de chaux d'après le pH et la teneur en argile du sol ainsi que l'utilisation du sol. 2/25

Tableau 23. Evaluation de l'état calcique du sol selon la saturation en bases (SB). 2/26

Tableau 24. Détermination d'amendement basique calcique à appliquer en fonction du taux de saturation en base (SB) et de la capacité d'échange des cations du sol. 2/26

9. Liste des figures

Figure 1. Evaluation du profil du sol. 2/3

Figure 2. Schéma des relations entre le pH et la pédogenèse ainsi que les facteurs écologiques. 2/5

Figure 3. Préparation des échantillons de terre pour l'analyse en laboratoire: tamisage à 2 mm pour séparer la terre fine du squelette. 2/6

Figure 4. Filtration des extraits de sol. 2/10

Figure 5. Détermination de divers éléments par spectrométrie en absorption atomique (AAS). 2/10

Figure 6. Essai de longue durée mis en place en 1989. Des doses différentes de P, K et Mg servent de base pour l'interprétation des analyses de sol. 2/10

Figure 7. Carence en P sur betterave sucrière. 2/11

Figure 8. Influence du niveau de fertilité du sol sur la croissance des plantes. 2/12

Figure 9. L'approvisionnement des cultures de racines d'endives en K est déterminant pour obtenir des chicons de bonne qualité. 2/16

Figure 10. Evolution des teneurs du sol en P (méthodes CO_2 et AAE10) en fonction de différents niveaux de fertilisation P (sans P, norme, $^5/_3$ de la norme) et leur influence sur le rendement du blé. 2/16

Figure 11. Schéma de calcul des besoins en engrais pour P, K et Mg. 2/20

Figure 12. Carence en P sur jeunes plantes de maïs. 2/20

Figure 13. Carence en K sur pomme de terre. 2/21

Figure 14. Carence en S sur choux-raves. 2/22

Figure 15. La carence en B (p. ex. après un chaulage excessif) entraîne la pourriture du cœur de la betterave. 2/23

Figure 16. Effets des apports de diverses substances organiques sur la teneur en humus et sur sa qualité. 2/29