

Publication spéciale  
Recherche Agronomique Suisse | Juin 2017



PRIF 2017

# Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse

**Coordinateurs**

Sokrat Sinaj et Walter Richner

**Auteurs principaux**

Christoph Carlen, René Flisch, Céline Gilli, Olivier Huguenin-Elie, Thomas Kuster, Annett Latsch, Jochen Mayer, Reto Neuweiler, Walter Richner, Sokrat Sinaj et Jean-Laurent Spring



## Impressum

<b>Editeur</b>	Agroscope Schwarzenburgstrasse 161, Liebefeld 3003 Berne, Suisse Tél. +41 58 463 84 18 www.agroscope.ch
<b>Coordinateurs</b>	Sokrat Sinaj et Walter Richner
<b>Auteurs et autrices</b>	André Ançay, Thomas Anken, Alice Baux, Guillaume Blanchet, Daniel Bretscher, Selma Cadot, Christoph Carlen, Claude-Alain Carron, Raphaël Charles, Brice Dupuis, Othmar Eicher, René Flisch, Céline Gilli, Jürg Hiltbrunner, Olivier Huguenin-Elie, Bernard Jeangros, Willy Kessler, Jürgen Krauss, Thomas Kuster, Annett Latsch, Lucie Leumann, Lilia Levy, Andreas Lüscher, Jochen Mayer, Harald Menzi, Eric Mosimann, Urs Müller, Reto Neuweiler, Hansrudolf Oberholzer, Didier Pellet, Josef Poffet, Jeanne Poulet, Volker Prasuhn, Walter Richner, Reto Rutishauser, Joachim Sauter, Patrick Schlegel, Sokrat Sinaj, Jean-Laurent Spring, Thibaut Verdenal, Hans Peter Wegmüller, Regula Wolz et Michael Zähner
<b>Rédaction</b>	Sibylle Willi, Evelyne Fasnacht, Andrea Leuenberger et Erika Meili
<b>Traductions</b>	Regula Wolz, Pierre A. Vullioud, Antoine Reist et Anne Maisonhaute
<b>Réalisation</b>	Blaise Demierre, Ursus Kaufmann et Olivier Bloch
<b>Photo de couverture</b>	Carole Parodi
<b>Impression</b>	Stämpfli SA, Berne
<b>Prix</b>	Version imprimée: CHF 21.–; version électronique: CHF 11.–
<b>Commande</b>	Office fédéral des constructions et de la logistique OFCL, Berne www.publicationsfederales.ch
<b>Internet</b>	www.prif.ch
<b>Référence bibliographique</b>	<b>Edition complète</b> Sinaj S. & Richner W., 2017. Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF 2017). Recherche Agronomique Suisse 8 (6), Publication spéciale, 276 p. <b>Chapitre distinct</b> Neuweiler R. & Krauss J., 2017. 10/ Fertilisation des cultures maraîchères. In: Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF 2017) (Ed. S. Sinaj & W. Richner). Recherche Agronomique Suisse 8 (6), Publication spéciale, 10/1–10/16.
<b>Copyright</b>	© Agroscope 2017

La fertilisation raisonnée des cultures agricoles est un élément central de la production végétale. Elle gagne encore en importance dans les systèmes de culture durables comme la production intégrée et l'agriculture biologique. La mise à jour régulière des recommandations de fertilisation contribue à un approvisionnement optimal des cultures en éléments nutritifs et permet de produire des denrées de haute qualité, tout en préservant durablement la fertilité du sol et en ménageant l'environnement.

Depuis 1964, les stations de recherche publient et actualisent régulièrement des ouvrages de référence qui reflètent l'état des connaissances en matière de fertilisation dans les conditions suisses. Les «Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse» (PRIF 2017) parus en 2017 constituent une grande avancée. Pour la première fois, un ouvrage conçu sous forme de modules regroupe les connaissances actuelles en matière de fertilisation et

nutrition des plantes pour tous les groupes de cultures présentes en Suisse: grandes cultures, cultures fourragères et différentes cultures spéciales. La nouvelle forme de la publication permet d'éliminer les doublons qui existaient auparavant et d'homogénéiser les concepts de fertilisation et les recommandations au-delà des groupes de cultures.

Les PRIF 2017 paraissent non seulement sous une forme nouvelle, mais comprennent également des nouveautés au niveau de leur contenu. Il faut citer notamment l'adaptation des normes de fertilisation, la mise à disposition et l'actualisation de nouveaux outils permettant de calculer les

normes et les besoins de fertilisation, l'harmonisation de l'interprétation des analyses de sol pour les divers groupes de cultures et l'adaptation des valeurs de référence pour les déjections d'éléments nutritifs et la consommation de fourrage des différentes catégories d'animaux.

Les PRIF 2017 sont publiées en français, en allemand et en italien sur un support papier. Elles sont désormais également disponibles en version électronique sur Internet. Si nécessaire, cette version pourra être actualisée plus rapidement et plus efficacement que la version imprimée.

Je suis convaincu que les conseillers et conseillères agricoles, les agriculteurs et agricultrices, les chercheurs et chercheuses ainsi que le personnel de l'administration auront à leur disposition avec les PRIF 2017 un outil actuel et complet couvrant les différents aspects de la fertilisation et de la nutrition des cultures agricoles. Je tiens à remercier vivement les spécialistes qui ont conçu cet ouvrage: les auteurs et autrices d'Agroscope et des autres instituts (BBZ Centre de formation et de conseil Arenenberg/TG, FiBL Institut de recherche de l'agriculture biologique, Engrais Hauert HBG SA, JardinSuisse, LBZ Centre de conseils agricoles Liebegg/AG, Ökohum GmbH, Union fruitière lémanique), les rédacteurs et les rédactrices, les traducteurs et les traductrices qui ont participé à la publication ainsi que les représentants des diverses institutions qui, dans le cadre d'une consultation, nous ont permis d'apporter de précieuses améliorations à ce document.



Michael Gysi, CEO Agroscope



1/	Introduction	1
2/	Caractéristiques et analyses du sol	2
3/	Analyses de plantes	3
4/	Propriétés et utilisation des engrais	4
5/	Techniques d'épandage des engrais de ferme, des engrais de recyclage et des engrais minéraux	5
6/	Fertilisation en agriculture biologique	6
7/	Fertilisation et environnement	7
8/	Fertilisation des grandes cultures	8
9/	Fertilisation des herbages	9
10/	Fertilisation des cultures maraîchères	10
11/	Fertilisation des cultures maraîchères sur substrat	11
12/	Fertilisation en viticulture	12
13/	Fertilisation en arboriculture	13
14/	Fertilisation des cultures de baies	14
15/	Fertilisation des plantes aromatiques et médicinales	15
16/	Fertilisation des plantes ornementales et des arbustes	16
17/	Annexes	17





## 1/ Introduction

Sokrat Sinaj<sup>1</sup>, René Flisch<sup>2</sup> et Walter Richner<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Agroscope, 1260 Nyon, Suisse

<sup>2</sup> Agroscope, 8046 Zurich, Suisse

Renseignements: [sokrat.sinaj@agroscope.admin.ch](mailto:sokrat.sinaj@agroscope.admin.ch)

## Table des matières

1. Destinataires des «Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse» .....	1/3
2. Buts et principes d'une fertilisation raisonnée .....	1/3
3. Bibliographie .....	1/5



## 1. Destinataires des «Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse»

Agroscope assure une révision périodique des «Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse» (PRIF), précédemment appelés «Données de base pour la fumure» (DBF). Il est ainsi possible de prendre en compte les résultats d'essais récents pour actualiser les normes de fertilisation et les valeurs de référence. Ce travail de révision tient compte également des résultats d'essais plus anciens, réévalués à la lumière de nouvelles connaissances, ainsi que des résultats d'autres pays dans la mesure où ils sont transposables à la Suisse.

Les PRIF sont destinés d'abord aux services de vulgarisation agricole. Ils représentent aussi un document de référence pour les enseignants et les offices fédéraux et cantonaux qui ont affaire à des problèmes de fertilisation des cultures agricoles. Finalement, les agriculteurs peuvent aussi en tirer parti comme document d'aide à la décision pour la mise en œuvre de la fertilisation.

Les progrès toujours plus rapides des techniques et des procédés de production ainsi que la diversité des cultures font que les PRIF ne peuvent pas donner réponse à toutes les questions. Pour des problèmes non résolus, il

convient de rechercher des solutions adéquates avec l'aide d'Agroscope et des services de vulgarisation.

Les données qui sont à la base des PRIF sont fondées scientifiquement et sont valables pour tous les systèmes de production agricole.

## 2. Buts et principes d'une fertilisation raisonnée

Les plantes prélèvent leurs nutriments dans le sol. Une partie quantifiable de ces nutriments sortent de l'exploitation sous forme de produits végétaux ou animaux.

L'objectif principal de la fertilisation est de réaliser un cycle des éléments nutritifs de l'exploitation aussi fermé que possible (figure 1) et d'optimiser la production végétale sans puiser dans les réserves du sol ni les enrichir inutilement.

Le terme fertilisation englobe tous les apports d'éléments nutritifs indispensables aux plantes. Selon leur part relative dans la matière sèche des végétaux, on les classe en **macronutriments** (N, P, K, Mg, Ca, S) et **micronutriments** ou **oligo-éléments** (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, etc.; Schilling 2000). La fertilisation consiste à assurer une nutrition des plantes leur permettant une croissance harmonieuse et la production d'une

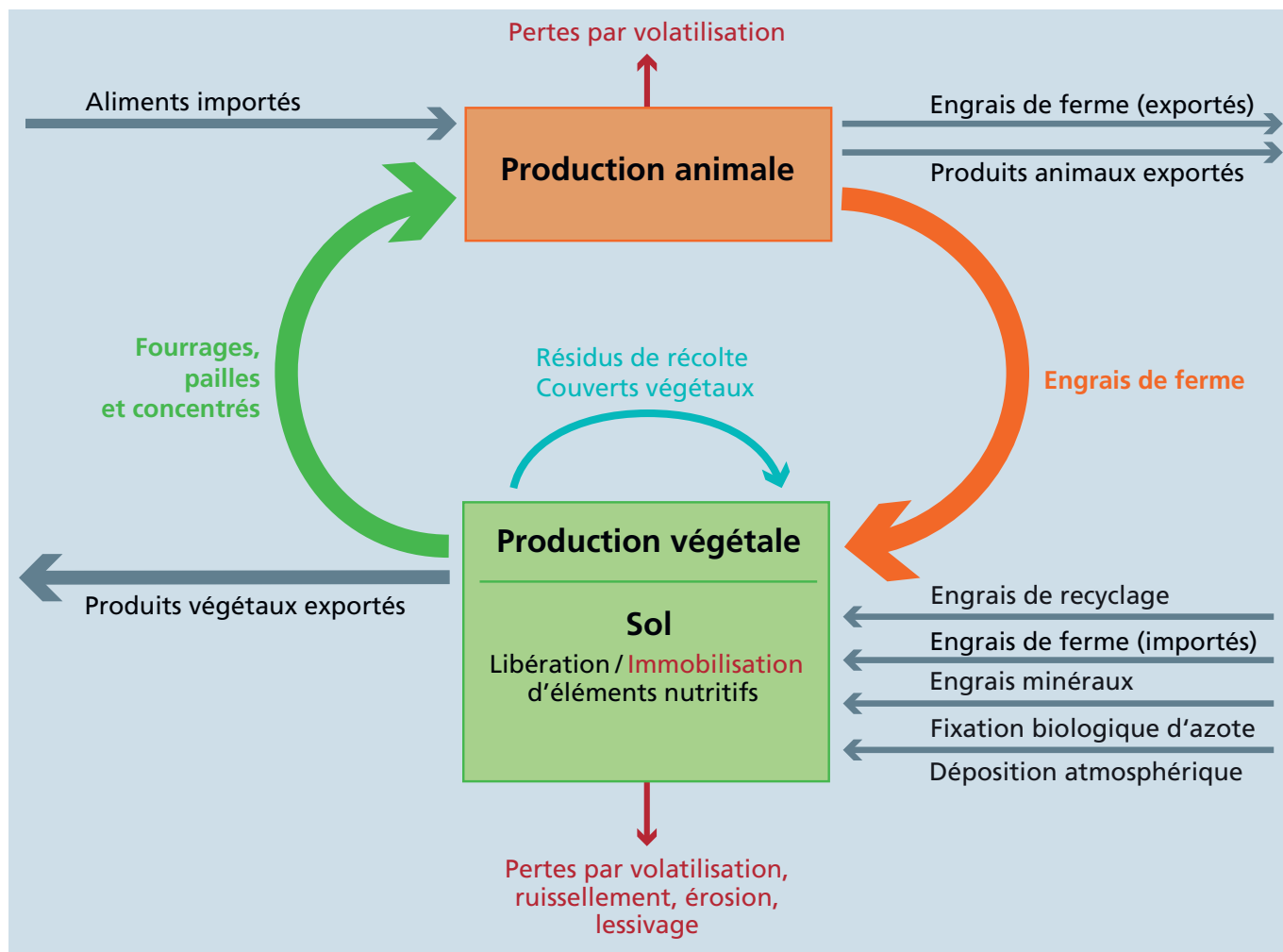


Figure 1. Cycle schématique des éléments nutritifs dans une exploitation agricole.

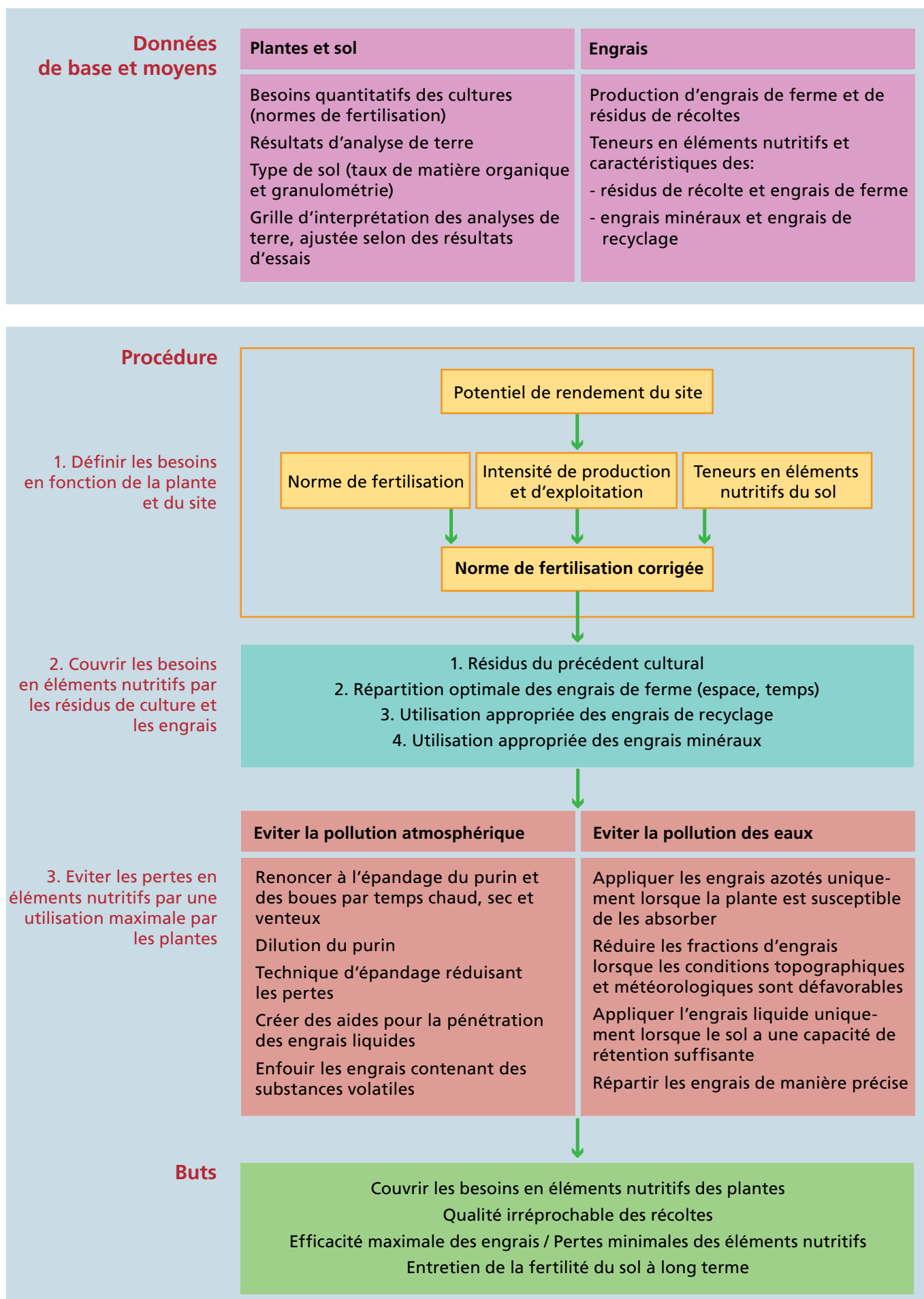


Figure 2. Concept de la fertilisation en agriculture pour une utilisation durable du sol.

récolte optimale de qualité irréprochable. Les objectifs de production doivent tenir compte des besoins des cultures tout en visant le minimum d'impact pour l'environnement.

Les exigences d'une fertilisation conforme aux besoins des plantes et à la préservation de l'environnement sont énumérées dans le « concept de fertilisation en agriculture » (figure 2). Il en ressort que pour une fertilisation dirigée réfléchie, les points suivants doivent être pris en compte :

- Les besoins (totaux et momentanés) en éléments nutritifs des plantes;
- L'état des éléments nutritifs dans le sol (teneur et disponibilité);
- La restitution des éléments nutritifs par les résidus de récolte;
- La quantité et la qualité des éléments nutritifs apportés par les engrais de ferme, les engrais de recyclage et les autres amendements organiques;
- La quantité et la qualité des éléments nutritifs apportés par les engrais minéraux;
- Le devenir des éléments nutritifs dans le système sol-plante-environnement (air, eau);
- La rentabilité économique de la fertilisation.

Deux lois fondamentales, particulièrement importantes pour la fumure, doivent être respectées:

1. **La loi du minimum** (Liebig 1855). Selon cette loi, l'élément le moins représenté ou le moins disponible pour la plante définit le niveau de rendement et la qualité de la récolte (éléments nutritifs, eau, lumière, température). L'analyse de terre permet généralement d'identifier le facteur limitant.
2. **La loi des accroissements moins que proportionnels** (Mitscherlich 1909). Cette loi démontre le fait biologique suivant: quand on apporte au sol des doses croissantes d'un élément fertilisant, le rendement ne croît pas proportionnellement. Cette loi se traduit par une courbe dont le sommet représente le rendement maximum possible. Le rendement optimal est atteint quand le gain de rendement couvre la dépense supplémentaire en engrais.

**Le but final de la fertilisation** est d'obtenir le meilleur rendement possible de la culture, compte tenu des autres facteurs qui y concourent (qualité du sol, climat, potentiel génétique de la culture, moyens d'exploitation), ainsi que la meilleure qualité de la récolte, et ce, à moindre coût. On vise également une utilisation efficace des ressources, veillant à la durabilité de la fertilité des sols et limitant les impacts négatifs sur l'environnement.

### 3. Bibliographie

- Liebig J. von, 1855. Die Grundsätze der Agricultur-Chemie mit Rücksicht auf die in England angestellten Untersuchungen. Vieweg und Sohn, Braunschweig, 107 p., Annexe 134 p.
- Mitscherlich E. A., 1909. Das Gesetz des Minimums und das Gesetz des abnehmenden Bodenertrages. Landwirtsch. Jahrb. 38, 537–552.
- Schilling G., 2000. Pflanzenernährung und Düngung. UTB, Stuttgart, 464 p.





## 2/ Caractéristiques et analyses du sol

René Flisch<sup>1</sup>, Reto Neuweiler<sup>2</sup>, Thomas Kuster<sup>2</sup>, Hansrudolf Oberholzer<sup>1</sup>,  
Olivier Huguenin-Elie<sup>1</sup> et Walter Richner<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Agroscope, 8046 Zurich, Suisse

<sup>2</sup> Agroscope, 8820 Wädenswil, Suisse

Renseignements: [rene.flisch@agroscope.admin.ch](mailto: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 <sub>2</sub> .....	2/10
4.2 Correction de la fertilisation Mg selon la méthode CaCl <sub>2</sub> .....	2/12
4.3 Correction de la fertilisation P, K et Mg selon la méthode H <sub>2</sub> O10.....	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

## 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 efficace 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. Évaluation 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  $\leq 2$  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.**

Propriétés	Valeurs de seuil pour l'interprétation des analyses chimiques				
	Sols sableux	Sols sableux-limoneux <sup>1</sup>	Sols limoneux <sup>1</sup>	Sols argilo-limoneux <sup>1</sup>	Sols argileux
	< 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 <sup>1</sup>
Aération	très élevée	bonne	bonne	moyenne	faible
Capacité de rétention pour les éléments nutritifs	faible	faible à moyenne	moyenne	bonne	très bonne <sup>1</sup>
Travail du sol	facile	facile	moyen	moyen à difficile	difficile
Pénétration des racines	très bonne	très bonne	bonne	médiocre	faible

<sup>1</sup> Disponibilité particulière pour 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 <sup>1</sup> 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)

<sup>1</sup> La teneur en humus du sol correspond à sa teneur en carbone organique (C<sub>org</sub>) 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 <sup>1</sup> (%) 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

<sup>1</sup> La teneur en humus du sol correspond à sa teneur en carbone organique (C<sub>org</sub>) 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 micro-éléments (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 ( $\text{CaCO}_3$ ) 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 <sub>2</sub> O)	Appréciation	Test HCl	Appréciation	Chaulage <sup>1</sup>
< 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 <sup>2</sup>
7,3–7,6	peu alcalin	+	calcaire	chaulage inutile
> 7,6	alcalin	++	fortement calcaire	chaulage inutile

<sup>1</sup> 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).

<sup>2</sup> Seulement si l'on observe une baisse du pH.

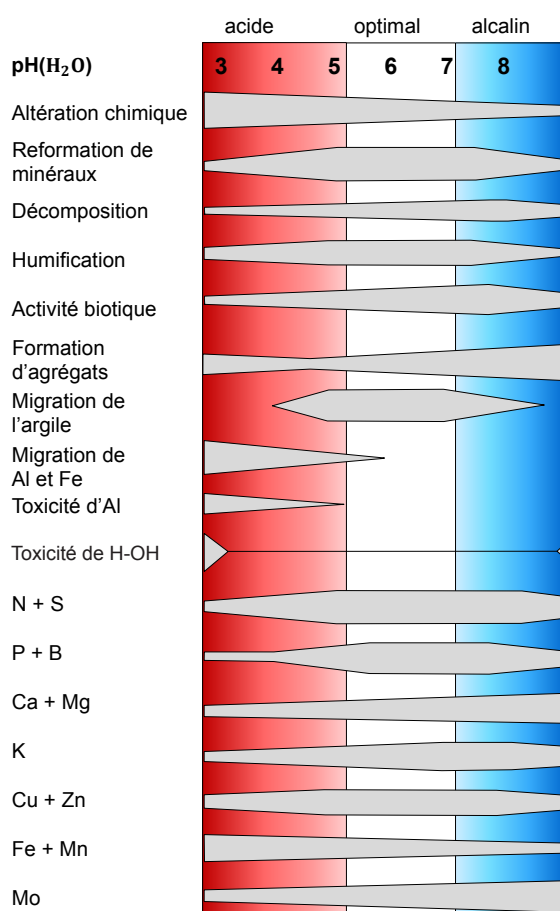


Figure 2. Schéma des relations entre le pH et la pédogenèse ainsi que les facteurs écologiques. La largeur des bandes indique l'intensité des processus et la disponibilité des éléments nutritifs (selon Schröder, 1984, modifié).

- **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 ( $\text{Ca}^{2+}$ ), 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  $\text{CaCO}_3$  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 <sup>1</sup>	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	Éviter 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 cultureux 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 cultureux 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	

<sup>1</sup> 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<sub>2</sub> pour définir P et K (méthode CO<sub>2</sub>), le chlorure de calcium pour Mg (méthode CaCl<sub>2</sub>) ou encore l'extrait à l'eau pour P, K et Mg (méthode H<sub>2</sub>O10). 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 optimiser 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 <sub>2</sub> )	Eau saturée de CO <sub>2</sub>	1:2,5	1 h	Indice P 1 = 0,0356 mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> par 100 g de terre (ou 0,155 mg P par kg de terre)
K (Méthode CO <sub>2</sub> )	Eau saturée de CO <sub>2</sub>	1:2,5	1 h	Indice K 1 = 1 mg K <sub>2</sub> O par 100 g de terre (ou 8,3 mg K par kg de terre)
Mg	0,0125 M CaCl <sub>2</sub>	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 <sup>+</sup>	Eau distillée	1:2,5	12 h	Valeur pH (pH(H <sub>2</sub> O))
CaCO <sub>3</sub> (calcaire total)	HCl concentré dilué 1:1 (volumes)			% volume de CaCO <sub>3</sub> g CaCO <sub>3</sub> par 100 g de terre
P, K, Mg (Méthode H <sub>2</sub> O10)	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 <sup>1</sup> - 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 <sup>1</sup>	Combustion par voie humide avec du K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> et titration			% C organique (C <sub>org</sub> ) % humus = % C <sub>org</sub> × 1,725
Humus, argile, silt (estimé)	Test tactile			%
Capacité d'échange des cations (CEC)	En sol avec pH(H <sub>2</sub> O) ≤ 5,9			CEC = (H <sup>+</sup> + K <sup>+</sup> + Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup> + Na <sup>+</sup> ) cmol+ par 100 g de terre (ancienne unité: méq/100 g de terre)
K <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup>	0,05 M HCl + 0,0125 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1:4	5 min	
H <sup>+</sup>	pH par différence	1:1	5 min	
Capacité d'échange des cations (CEC)	En sol avec pH(H <sub>2</sub> O) > 5,9			CEC = (H <sup>+</sup> + K <sup>+</sup> + Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup> + Na <sup>+</sup> ) cmol+ par 100 g de terre (ancienne unité: méq/100 g de terre)
K <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup>	0,1 M chlorure de baryum + 2 M triéthanolamine	1:25	15 h à 45 °C, puis agitation 1 h	
H <sup>+</sup>	Titration			
Saturation des bases (SB)	Calcul		–	SB (%) = (K <sup>+</sup> + Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup> + Na <sup>+</sup> ) cmol+ × 100 / CEC
NO <sub>3</sub> -N NH <sub>4</sub> -N	0,0125 M CaCl <sub>2</sub>	1:4	1 h	kg N <sub>min</sub> par ha

<sup>1</sup> 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  $\text{CaCO}_3$  est dissous et les ions  $\text{Ca}^{2+}$  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 <sup>1</sup> [Code de méthode]						
	Caractéristiques su sol				Éléments nutritifs (P, K, Mg, Ca) <sup>2</sup>		
	pH <sub>(H<sub>2</sub>O)</sub> [pHH]	CaCO <sub>3</sub> [CaCO <sub>3</sub> ]	Humus [C <sub>org</sub> ]	Granulométrie [KOF]	P, K, Mg [CO <sub>2</sub> /CCMg]	P, K, Mg, Ca [AAE10] <sup>3</sup>	P, K, Mg [H <sub>2</sub> O10] <sup>4</sup>
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 <sup>5</sup>	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

<sup>1</sup> Méthodes de référence des stations de recherche Agroscope, volume 1: Analyses de terre pour le conseil de fumure (Agroscope 1996).

<sup>2</sup> 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.

<sup>3</sup> P et Mg seulement en sols non calcaires.

<sup>4</sup> 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).

<sup>5</sup> 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  $\leq 2$  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<sub>2</sub>

La méthode CO<sub>2</sub> (Dirks et Scheffer 1930), utilisée en Suisse depuis des dizaines d'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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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 <sub>h</sub> ) <sup>1</sup>	(f) <sup>1</sup>	(h)	(d <sub>h</sub> ) <sup>1</sup>	(f) <sup>1</sup>
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	Calcul du poids volumique:		
18,0	0,8646	0,786	$d_h = 1,488 * 10^{-0,0131 * h}$		
19,0	0,8389	0,762	Calcul de la correction d'après la teneur en humus (f):		
20,0	0,8140	0,740	$f = d_h / d_{h=10,0}$		

<sup>1</sup> 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<sub>2</sub>) et en argile du sol.**  
(indice P 1,0 = 0,155 mg P/kg de terre)

Pour les teneurs en humus  $\geq 10$  %, 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 <sup>1</sup>	Sols spéciaux sableux <sup>2</sup>
		< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	$\geq 40$		
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
$\geq 4,656$	$\geq 30,0$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

<sup>1</sup> Sols silteux issus de l'altération des schistes des Grisons ayant une teneur en argile <25 % et une teneur en silt >40 %.

<sup>2</sup> 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<sub>2</sub>

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<sub>2</sub> est courante dans de nombreux pays d'Europe. Lorsque les résultats d'autres méthodes d'analyse sont difficiles à évaluer, la méthode CaCl<sub>2</sub> fournit des résultats précieux étayés par la littérature.

#### 4.3 Correction de la fertilisation P, K et Mg selon la méthode H<sub>2</sub>O<sub>10</sub>

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<sub>2</sub>) et en argile du sol.**  
(Indice K 1,0 = 8,3 mg K/kg de terre)

Pour les teneurs en humus  $\geq 10$  %, 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	$\geq 40$
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
$\geq 83,00$	$\geq 10,0$	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<sub>2</sub>O10. 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  $\geq 10$  %, 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; Zbiral 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<sup>2+</sup> 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<sup>2+</sup> 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<sub>3</sub> est dissous, les ions Ca<sup>2+</sup> 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<sub>2</sub>) et en argile du sol.**  
(Indice Mg 1,0 = 10 mg Mg/kg de terre).

Pour les teneurs en humus  $\geq 10$  %, 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	$\geq 40$
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
$\geq 300,0$	$\geq 30,0$	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<sub>2</sub>O10) et la teneur en argile du sol.**

Si la teneur en humus  $\geq 10$  %, 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****Vigne<sup>1</sup>**

P-H <sub>2</sub> O10 mg P/kg	Teneur en argile de la terre fine (%); pH $\geq 5,0$ et $\leq 7,8$					P-H <sub>2</sub> O10 mg P/kg	Teneur en argile de la terre fine (%); pH $\geq 5,0$ et $\leq 7,8$				
	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	$\geq 40$		< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	$\geq 40$
0,0–1,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	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	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	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	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	8,0–9,9	1,2	0,8	0,8	0,0	0,0
10,0–11,9	1,0	0,6	0,6	0,0	0,0	10,0–11,9	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12,0–13,9	0,8	0,4	0,4	0,0	0,0	12,0–13,9	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
14,0–15,9	0,8	0,4	0,0	0,0	0,0	$\geq 14,0$	0,0	0,0	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						
$\geq 24,0$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0						

<sup>1</sup> 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<sub>2</sub>O10) 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						Vigne <sup>1</sup>					
K-H <sub>2</sub> O10 mg K/kg	Teneur en argile de la terre fine (%)					K-H <sub>2</sub> O10 mg K/kg	Teneur en argile de la terre fine (%)				
	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40		< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40
0–4,9	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	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	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	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	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	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	25,0–29,9	1,1	1,1	1,1	0,0	0,0
30,0–34,9	1,0	1,0	1,0	0,4	0,4	30,0–34,9	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0
35,0–39,9	1,0	1,0	1,0	0,4	0,4	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	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	≥ 45,0	0,0	0,0	0,0	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						

<sup>1</sup> 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<sub>2</sub>O10) 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						Vigne <sup>1</sup>					
Mg-H <sub>2</sub> O10 mg Mg/kg	Teneur en argile de la terre fine (%)					Mg-H <sub>2</sub> O10 mg Mg/kg	Teneur en argile de la terre fine (%)				
	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	≥ 40		< 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	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	5,0–9,9	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5
10,0–14,9	1,0	1,2	1,2	1,4	1,4	10,0–14,9	1,1	1,2	1,2	1,4	1,4
15,0–19,9	1,0	1,0	1,0	1,2	1,2	15,0–19,9	0,8	1,1	1,1	1,2	1,2
20,0–24,9	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	20,0–24,9	0,0	1,0	1,0	1,1	1,1
25,0–29,9	0,4	1,0	1,0	1,0	1,0	25,0–29,9	0,0	0,8	0,8	0,9	0,9
30,0–34,9	0,0	0,8	0,8	0,8	0,8	30,0–34,9	0,0	0,0	0,0	0,8	0,8
35,0–39,9	0,0	0,6	0,6	0,8	0,8	≥ 35,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
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						

<sup>1</sup> 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 concentra-



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).

tion 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.

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  $\geq 10\%$ , il faut prendre en compte les indications du tableau 9.

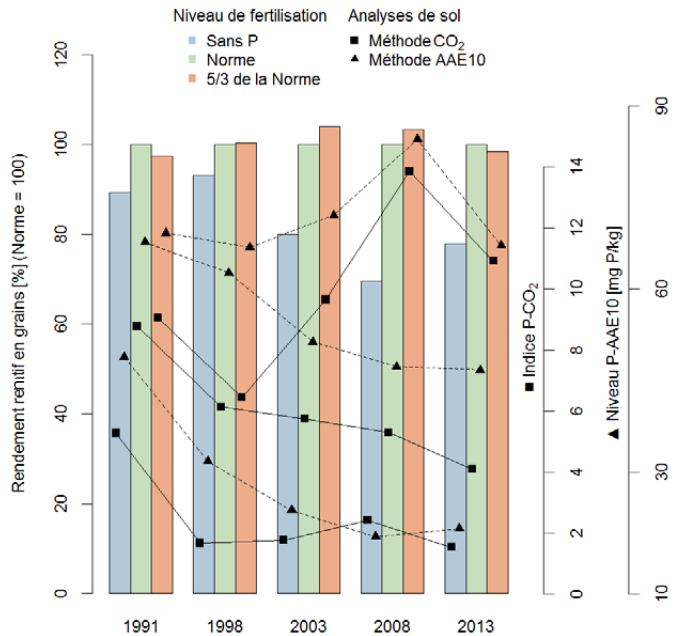


Figure 10. Evolution des teneurs du sol en P (méthodes  $CO_2$  et AAE10) en fonction de différents niveaux de fertilisation P (sans P, norme,  $5/3$  de la norme) et leur influence sur le rendement du blé dans un essai de longue durée installé en 1989 sur le domaine Agroscope de Zurich-Reckenholz, dans 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'appropriier 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<sub>3</sub> 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<sub>3</sub> 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				Légumes, arbres fruitiers, petits fruits, plantes aromatiques et médicinales				Vigne <sup>1</sup>										
P-AAE10 mg P/kg	Teneur en argile de la terre fine (%); sols non calcaires				P-AAE10 mg P/kg	Teneur en argile de la terre fine (%); sols non calcaires				P-AAE10 mg P/kg	Teneur en argile de la terre fine (%); sols non calcaires							
	< 10	10-19,9	20-29,9	30-39,9		≥ 40	< 10	10-19,9	20-29,9		30-39,9	≥ 40	< 10	10-19,9	20-29,9	30-39,9	≥ 40	
0-4,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	0-4,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	0-4,9	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
5,0-9,9	1,5	1,5	1,4	1,4	1,2	5,0-9,9	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	5,0-9,9	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
10,0-14,9	1,5	1,4	1,4	1,2	1,2	10,0-14,9	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	10,0-14,9	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
15,0-19,9	1,4	1,4	1,2	1,2	1,2	15,0-19,9	1,5	1,4	1,4	1,4	1,2	15,0-19,9	1,5	1,5	1,5	1,3	1,3	1,3
20,0-24,9	1,4	1,2	1,2	1,2	1,0	20,0-24,9	1,4	1,4	1,4	1,2	1,2	20,0-24,9	1,5	1,4	1,4	1,2	1,2	1,2
25,0-29,9	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0	25,0-29,9	1,4	1,4	1,2	1,2	1,2	25,0-29,9	1,5	1,4	1,4	1,0	1,0	1,0
30,0-34,9	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0	30,0-34,9	1,4	1,2	1,2	1,2	1,2	30,0-34,9	1,5	1,3	1,3	0,9	0,9	0,9
35,0-39,9	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	35,0-39,9	1,4	1,2	1,2	1,2	1,0	35,0-39,9	1,5	1,3	1,3	0,8	0,8	0,8
40,0-44,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	40,0-44,9	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0	40,0-44,9	1,4	1,2	1,2	0,0	0,0	0,0
45,0-49,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	45,0-49,9	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0	45,0-49,9	1,4	1,1	1,1	0,0	0,0	0,0
50,0-54,9	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8	50,0-54,9	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	50,0-54,9	1,4	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
55,0-59,9	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8	55,0-59,9	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	55,0-59,9	1,4	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
60,0-64,9	1,0	1,0	0,8	0,8	0,8	60,0-64,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	60,0-64,9	1,3	0,9	0,9	0,0	0,0	0,0
65,0-69,9	1,0	0,8	0,8	0,6	0,6	65,0-69,9	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8	65,0-69,9	1,3	0,9	0,9	0,0	0,0	0,0
70,0-74,9	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6	70,0-74,9	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8	70,0-74,9	1,3	0,8	0,8	0,0	0,0	0,0
75,0-79,9	0,8	0,8	0,6	0,6	0,6	75,0-79,9	1,0	1,0	0,8	0,8	0,8	75,0-79,9	1,3	0,8	0,8	0,0	0,0	0,0
80,0-84,9	0,8	0,6	0,6	0,6	0,4	80,0-84,9	1,0	0,8	0,8	0,8	0,8	80,0-84,9	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
85,0-89,9	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	85,0-89,9	1,0	0,8	0,8	0,8	0,4	85,0-89,9	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
90,0-94,9	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	90,0-94,9	0,8	0,8	0,8	0,4	0,4	90,0-94,9	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
95,0-99,9	0,6	0,4	0,4	0,4	0,0	95,0-99,9	0,8	0,8	0,4	0,4	0,4	95,0-99,9	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
100,0-104,9	0,4	0,4	0,4	0,0	0,0	100,0-104,9	0,8	0,4	0,4	0,4	0,0	100,0-104,9	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
105,0-109,9	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0	105,0-109,9	0,4	0,4	0,4	0,0	0,0	105,0-109,9	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
110,0-114,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	110,0-114,9	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0	110,0-114,9	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
115,0-119,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	115,0-119,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	115,0-119,9	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
120,0-124,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	120,0-124,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	120,0-124,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
≥ 125,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	≥ 125,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	≥ 125,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

<sup>1</sup> 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  $\geq 10\%$ , 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  $> 25\text{ g K/kg}$  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				Légumes, arbres fruitiers, petits fruits, plantes aromatiques et médicinales				Vigne									
K-AAE10	Teneur en argile de la terre fine (%)			K-AAE10	Teneur en argile de la terre fine (%)			K-AAE10	Teneur en argile de la terre fine (%)								
mg K/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	$\geq 40$	mg K/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	$\geq 40$	mg K/kg	< 10	10–19,9	20–29,9	30–39,9	$\geq 40$
0–19,9	1,5	1,5	1,4	1,4	1,2	0–19,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,2	0–19,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
20–39,9	1,5	1,4	1,4	1,4	1,2	20–39,9	1,5	1,4	1,4	1,4	1,2	20–39,9	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4
40–59,9	1,4	1,4	1,3	1,2	1,0	40–59,9	1,4	1,4	1,4	1,2	1,2	40–59,9	1,5	1,4	1,4	1,2	1,2
60–79,9	1,4	1,2	1,2	1,2	1,0	60–79,9	1,4	1,2	1,2	1,2	1,0	60–79,9	1,5	1,4	1,4	1,2	1,2
80–99,9	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0	80–99,9	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0	80–99,9	1,4	1,2	1,2	1,0	1,0
100–119,9	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0	100–119,9	1,2	1,2	1,0	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	0,8	120–139,9	1,2	1,0	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	140–159,9	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8	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	160–179,9	1,0	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	1,0	0,8	0,8	0,6	180–199,9	1,0	1,0	0,8	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	0,8	0,6	200–219,9	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	0,6	0,6	220–239,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	220–239,9	0,8	0,8	0,8	0,0	0,0
240–259,9	0,8	0,8	0,6	0,6	0,4	240–259,9	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6	240–259,9	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
260–279,9	0,8	0,6	0,6	0,6	0,4	260–279,9	0,8	0,6	0,6	0,6	0,6	260–279,9	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0
280–299,9	0,6	0,6	0,6	0,4	0,0	280–299,9	0,8	0,6	0,6	0,4	0,4	280–299,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
300–319,9	0,6	0,6	0,4	0,4	0,0	300–319,9	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	300–319,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
320–339,9	0,6	0,4	0,4	0,0	0,0	320–339,9	0,6	0,4	0,4	0,4	0,0	320–339,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
340–359,9	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0	340–359,9	0,6	0,4	0,4	0,0	0,0	340–359,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
360–379,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	360–379,9	0,4	0,4	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	380–399,9	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	400–419,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	400–419,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\geq 420$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	$\geq 420$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	$\geq 420$	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<sub>3</sub> 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<sub>3</sub> 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		Légumes, arbres fruitiers, petits fruits, plantes aromatiques et médicinales					Vigne <sup>1</sup>										
Mg-AAE10	Teneur en argile de la terre fine (%): sols non calcaires					Mg-AAE10	Teneur en argile de la terre fine (%): sols non calcaires					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	mg Mg/kg	< 10	10-19,9	20-29,9	30-39,9	≥ 40	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	0-24,9	1,2	1,4	1,4	1,5	1,5	0-24,9	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
25-49,9	1,2	1,2	1,4	1,4	1,5	25-49,9	1,2	1,4	1,4	1,5	1,5	25-49,9	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5
50-74,9	1,2	1,2	1,4	1,4	1,4	50-74,9	1,2	1,2	1,4	1,4	1,5	50-74,9	1,2	1,5	1,5	1,5	1,5
75-99,9	1,0	1,2	1,2	1,2	1,4	75-99,9	1,0	1,2	1,2	1,4	1,4	75-99,9	1,0	1,4	1,4	1,5	1,5
100-124,9	1,0	1,0	1,2	1,2	1,4	100-124,9	1,0	1,2	1,2	1,2	1,4	100-124,9	0,8	1,3	1,3	1,4	1,4
125-149,9	0,8	1,0	1,0	1,2	1,2	125-149,9	1,0	1,0	1,2	1,2	1,4	125-149,9	0,0	1,1	1,2	1,3	1,4
150-174,9	0,8	1,0	1,0	1,0	1,2	150-174,9	0,8	1,0	1,0	1,2	1,2	150-174,9	0,0	0,9	1,0	1,3	1,3
175-199,9	0,4	0,8	1,0	1,0	1,2	175-199,9	0,6	1,0	1,0	1,0	1,2	175-199,9	0,0	0,8	0,9	1,2	1,3
200-224,9	0,4	0,8	0,8	1,0	1,0	200-224,9	0,6	0,8	1,0	1,0	1,2	200-224,9	0,0	0,0	0,8	1,1	1,2
225-249,9	0,4	0,6	0,8	1,0	1,0	225-249,9	0,4	0,8	0,8	1,0	1,0	225-249,9	0,0	0,0	0,0	1,0	1,1
250-274,9	0,0	0,6	0,6	0,8	1,0	250-274,9	0,4	0,6	0,8	1,0	1,0	250-274,9	0,0	0,0	0,0	0,9	1,0
275-299,9	0,0	0,4	0,6	0,8	1,0	275-299,9	0,4	0,6	0,8	0,8	1,0	275-299,9	0,0	0,0	0,0	0,8	0,9
300-324,9	0,0	0,0	0,4	0,6	0,8	300-324,9	0,4	0,4	0,6	0,8	1,0	300-324,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
325-349,9	0,0	0,0	0,4	0,6	0,8	325-349,9	0,0	0,4	0,6	0,6	0,8	325-349,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
350-374,9	0,0	0,0	0,0	0,4	0,6	350-374,9	0,0	0,4	0,4	0,6	0,8	350-374,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
375-399,9	0,0	0,0	0,0	0,4	0,6	375-399,9	0,0	0,0	0,4	0,4	0,6	375-399,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
400-424,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	400-424,9	0,0	0,0	0,0	0,4	0,6	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	425-449,9	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	≥ 450	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	≥ 450	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

<sup>1</sup> 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 (kg P/ha, kg K/ha, kg Mg/ha)	=	Norme de fertilisation de la culture <sup>1</sup> (kg P/ha, kg K/ha, kg Mg/ha)	*	Facteur de correction (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

<sup>1</sup> 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<sub>2</sub>O/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<sub>2</sub>O/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 affouragement exclusivement avec les produits de l'exploitation, le seuil ne devrait

pas être dépassé. En revanche, si une partie de l'affouragement 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 <sup>1</sup>	supplément > 40 kg N/ha	1
	variation +/- 40 kg N/ha	3
	réduction > 40 kg N/ha	5

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

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

<sup>2</sup> 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).**

Élément nutritif	Teneur du sol (mg/kg)		Appréciation	Classe de fertilité	Teneur en humus < 10 %		Teneur en humus ≥ 10 %			
					Cultures peu exigeantes	Cultures exigeantes <sup>1</sup>	Sols acides et faiblement acides		Sols neutres et alcalins	
							Cultures peu exigeantes	Cultures exigeantes <sup>1</sup>	Cultures peu exigeantes	Cultures exigeantes <sup>1</sup>
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 <sup>2</sup>	
	> 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 <sup>2</sup>	
	> 2	> 50	satisfaisant	C	–	–	–	–	–	–

<sup>1</sup> B: betteraves, colza, tournesol, céleri, vigne, fruits à pépins, fruits à noyau; Mn: céréales, légumineuses, épinards, betteraves, fruits à pépins, fruits à noyau.

<sup>2</sup> 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).

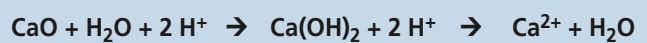
## 5. Chaulage

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<sub>3</sub> 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<sup>+</sup>) et monter le pH ainsi que la sorption des ions Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup>. Ces réactions sont le fait des oxydes de Ca (CaO), des hydroxydes de Ca (Ca(OH)<sub>2</sub>), ainsi que des carbonates de Ca (CaCO<sub>3</sub>) ou de Mg (MgCO<sub>3</sub>). 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<sub>3</sub> ou à la molécule d'hydroxyde de Ca [Ca(OH)<sub>2</sub>] qui se forme dans le sol à partir du CaO.

Formules de l'effet neutralisant des amendements basiques calciques:



Le gypse (CaSO<sub>4</sub> · 2 H<sub>2</sub>O) 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(H<sub>2</sub>O) 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):

$$E \text{ (kg CaO)} = 1,0 \times \text{CaO} + 1,4 \times \text{MgO} + 0,6 \times \text{K}_2\text{O} + 0,9 \times \text{Na}_2\text{O} - 0,4 \times \text{P}_2\text{O}_5 - 0,7 \times \text{SO}_3 - 0,8 \times \text{Cl} - n \times \text{N}$$

(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 <sub>(H<sub>2</sub>O)</sub> du sol	Chaulage de correction <sup>1</sup>		Chaulage d'entretien	
		dt CaO/ha		dt CaO/ha tous les 4-5 ans	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 <sup>2</sup>	5–7 <sup>3</sup>	1,0–2,5
	5,9–6,2	10	5 <sup>2</sup>	5–7 <sup>3</sup>	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 <sup>3</sup>	1,5–2,5
	5,9–6,2	15	7,5	6–9 <sup>3</sup>	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 <sup>2</sup>	8–10 <sup>3</sup>	2,5–3,5
	5,9–6,2	20	10 <sup>2</sup>	8–10 <sup>3</sup>	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 <sup>2</sup>	9–12 <sup>2</sup>	2–5
	5,9–6,7	25	15 <sup>2</sup>	9–12 <sup>2</sup>	1–2
	> 6,7	0	0	–	0–1,5
≥ 10 % humus		0	0	–	–

<sup>1</sup> 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<sup>+</sup>) et non la teneur en Ca du sol.

<sup>2</sup> En général, un chaulage d'entretien tous les quatre à cinq ans est suffisant.

<sup>3</sup> 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<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>). 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<sub>(H<sub>2</sub>O)</sub> 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).

Terres assolées	SB (%)		Qualification de l'état calcique du sol	Classement
	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.

Terres assolées	SB (%)		Apport de CaO (dt/ha) selon la capacité d'échange des cations (cmol+/100 g de terre) <sup>1</sup>			
	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 <sup>2</sup>
40–49	30–39	40–49	10,0	19,0	21,5 <sup>2</sup>	28,0 <sup>2</sup>
< 40	< 30	< 40	13,0	24,5 <sup>2</sup>	27,5 <sup>2</sup>	36,0 <sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Fractionner en 2–3 apports espacés de 2–4 ans. Avant chaque nouvel apport, une analyse du pH du sol est recommandée.

noncues 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 détremés, 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'écheonner 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 biologique 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<sub>2</sub>, 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. À 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 hu-

mus, 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 Évaluation 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.

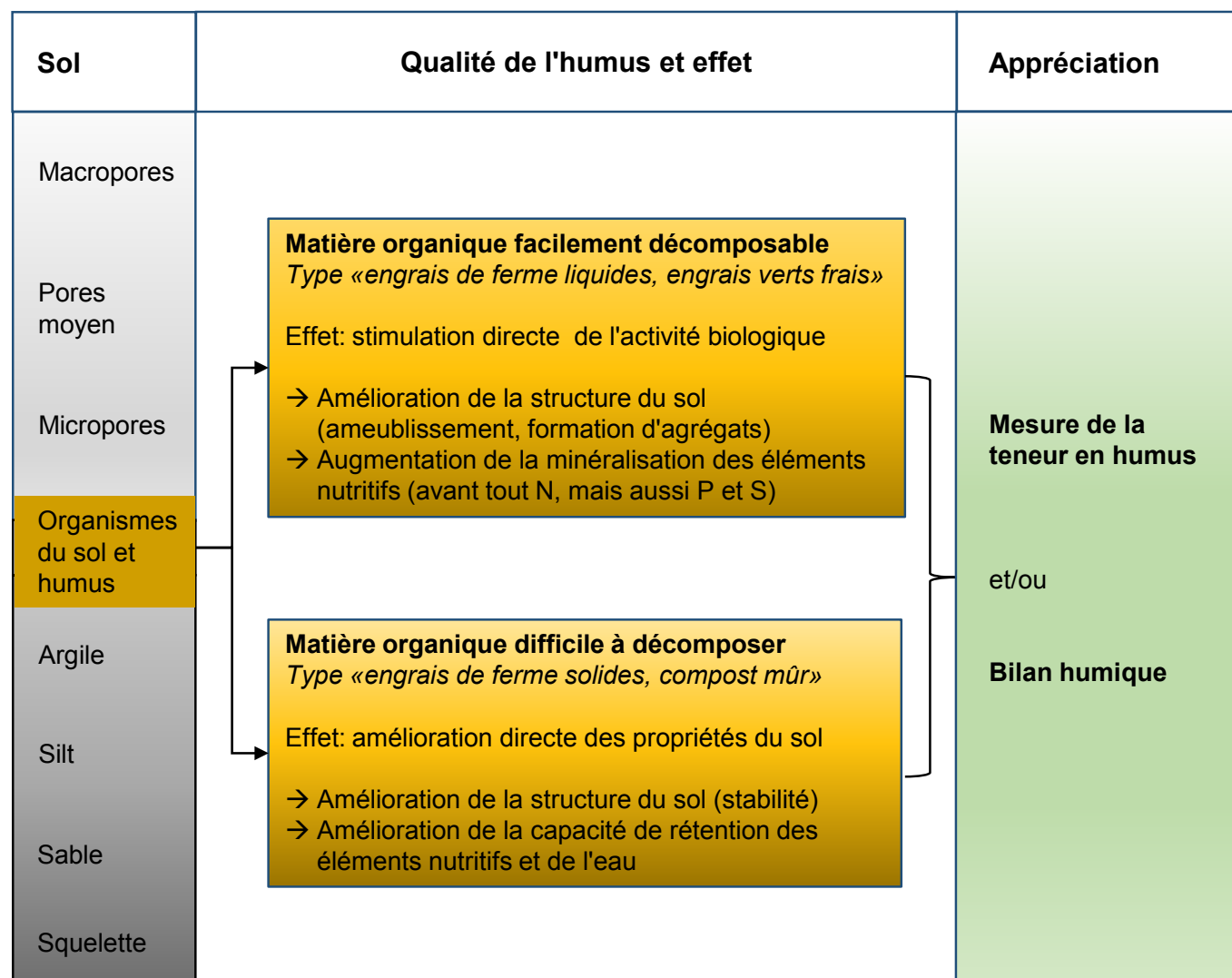


Figure 16. Effets des apports de diverses substances organiques sur la teneur en humus et sur sa qualité.

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 Bodenkonzzept 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<sub>4</sub>OAc-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.
- Jeanros 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 matière 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/hofduflusse> [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<sub>2</sub>-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 1<sup>er</sup> 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 optimiser 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 <sub>2</sub> ) et en argile du sol. ....	2/12
Tableau 11. Facteurs de correction de la fertilisation K selon des teneurs en K (méthode CO <sub>2</sub> ) et en argile du sol. ....	2/13
Tableau 12. Facteur de correction de la fertilisation Mg selon des teneurs en Mg (méthode CaCl <sub>2</sub> ) 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 <sub>2</sub> O10) 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 <sub>2</sub> O10) 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 <sub>2</sub> O10) 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 <sub>2</sub> 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





### 3/ Analyses de plantes

Sokrat Sinaj <sup>1</sup>, Guillaume Blanchet <sup>1</sup>, Selma Cadot <sup>1</sup>, Thomas Kuster <sup>2</sup>,  
Raphaël Charles <sup>1</sup> et Bernard Jeangros <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Agroscope, 1260 Nyon, Suisse

<sup>2</sup> Agroscope, 8820 Wädenswil, Suisse

Renseignements: [sokrat.sinaj@agroscope.admin.ch](mailto:sokrat.sinaj@agroscope.admin.ch)

## Table des matières

1. Introduction .....	3/3
2. Principes généraux concernant la nutrition des plantes .....	3/3
3. Analyses des échantillons de plantes et méthodologie de l'échantillonnage .....	3/4
4. Interprétation des résultats d'analyses de plantes .....	3/5
5. Complémentarité entre analyses de plantes et analyses de sol .....	3/7
6. Bibliographie .....	3/8
7. Liste des tableaux .....	3/10
8. Liste des figures .....	3/10

*Couverture: jeunes plantes de maïs présentant des symptômes de carence dans un essai de fertilisation PK à Changins (photo: Carole Parodi, Agroscope).*



## 1. Introduction

En complément de l'analyse de sol, il est possible de réaliser une analyse de plantes pendant la période végétative. L'analyse de plantes permet d'évaluer l'état de nutrition des cultures, tandis que l'analyse de sol ne permet qu'une estimation du stock des éléments nutritifs potentiellement disponibles pour celles-ci. L'analyse de plantes fait donc partie des moyens complémentaires à disposition pour une conduite dynamique de la fertilisation des cultures agricoles en cours de croissance et pour établir un diagnostic précis lors d'un problème apparent de fertilisation. A l'échelle de la rotation, l'analyse de plantes permet d'optimiser les apports d'éléments nutritifs en déterminant précisément les quantités minimales requises par une culture pour obtenir un rendement et une qualité optimaux. Elle vise ainsi à minimiser l'impact environnemental des pratiques de fertilisation en optimisant l'efficacité des engrais apportés.

Toutefois, l'interprétation d'une analyse de plantes est aussi complexe que celle d'une analyse de sol, puisque les teneurs en éléments nutritifs sont fortement liées aux conditions d'échantillonnage (date de prélèvement, partie de la plante prélevée). Il est par conséquent essentiel de comprendre les différents mécanismes de nutrition mis en œuvre par les végétaux afin de pouvoir réaliser des analyses adaptées aux différentes cultures et obtenir des informations fiables et précises quant à leur état de nutrition.

## 2. Principes généraux concernant la nutrition des plantes

Les besoins en éléments nutritifs des cultures évoluent au cours de leur cycle de développement (figures 1 à 4, module 8). Cela implique que les plantes doivent être capables de réguler leur capacité à assimiler les éléments nutritifs

présents dans le sol en quantités variables et sous des formes plus ou moins disponibles (Reuter et Robinson 1997). Les mécanismes de régulation mis en œuvre par les plantes leur permettent de maintenir des teneurs en éléments nutritifs à des niveaux garantissant un fonctionnement vital. Par exemple, chez des plantes qui se sont développées sur des substrats dont les concentrations en phosphore (P) variaient d'un facteur 625, la différence de concentration dans les tissus végétaux était de l'ordre de 10 seulement (Asher et Loneragan 1967). Cela illustre la capacité des plantes à réguler leur nutrition dans des substrats plus ou moins riches en éléments nutritifs. Lors de la fertilisation d'une parcelle, on vise une teneur optimale dans les tissus de la plante pour atteindre les objectifs de rendement et de qualité fixés et on cherche à éviter les conditions de manque (carence) ou d'excès (consommation de luxe) (figure 1). De plus, l'assimilation de certains éléments est influencée par la présence d'autres éléments nutritifs: on parle d'antagonisme lorsque l'assimilation d'un élément se fait au détriment d'un autre [exemple du potassium (K) et du magnésium (Mg)] et qu'il y a un risque de carence (Marschner 2012). Enfin, lorsqu'un élément est présent en quantité particulièrement abondante, son prélèvement peut dépasser les besoins effectifs de la plante, sans que le rendement ne soit amélioré. On parle alors d'une consommation «de luxe» (Marschner 2012).

Au cours du cycle de développement d'une plante, les teneurs en éléments nutritifs évoluent sensiblement. À l'échelle de la plante entière, la teneur globale en éléments nutritifs diminue progressivement, au fur et à mesure que la plante génère de la biomasse (Greenwood et al. 1990; Salette et Lemaire 1981). Une dilution des éléments nutritifs s'opère car la plante réalloue de façon spécifique ses ressources aux organes en croissance. Par ailleurs, on observe une disparité des teneurs pour un même élément nutritif entre les différents organes constitutifs d'une même plante.

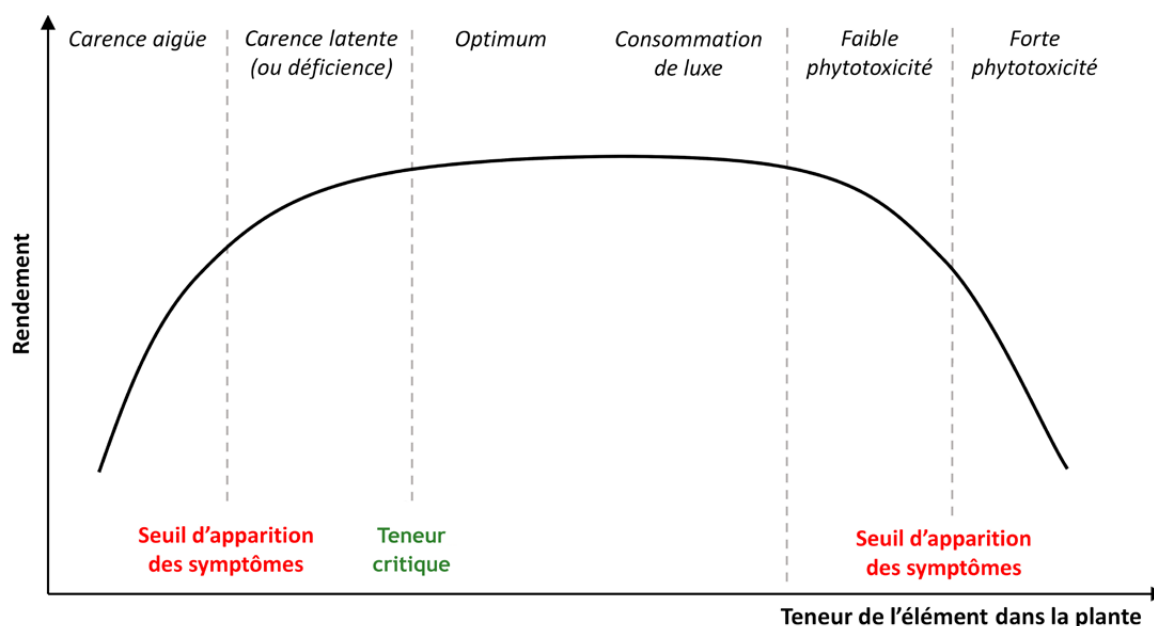


Figure 1. Courbe théorique du rendement de culture en fonction de la teneur d'un élément nutritif dans les tissus de la plante (adaptée de Marschner 2012).

L'interprétation de l'analyse de plantes doit tenir compte de la variabilité des teneurs en éléments selon l'espèce considérée, la partie étudiée et le stade phénologique lors de l'échantillonnage. En fonction de ces critères, il est alors possible d'établir un diagnostic fiable quant à l'état de nutrition de la culture considérée.

### 3. Analyses des échantillons de plantes et méthodologie de l'échantillonnage

Différentes analyses de plantes peuvent être envisagées selon le type de culture en place et les objectifs fixés.

En cas de carence aiguë ou d'excès marqué, une simple observation visuelle peut suffire à identifier des symptômes de carence ou d'excès. Ces derniers se caractérisent souvent par un changement de coloration au niveau des feuilles, ou encore par l'apparition de nécrose ou de déformation au niveau de certaines parties de la plante. De nombreux ouvrages peuvent aider à l'identification visuelle de ces déséquilibres nutritionnels, mais une certaine expérience est souvent nécessaire pour établir un diagnostic correct. Il est donc préférable de faire appel à un spécialiste. Des exemples sont néanmoins fournis dans les modules concernant l'arboriculture et la vigne (modules 12 et 13). Lorsque les symptômes apparaissent, il est souvent trop tard pour pouvoir réaliser une correction efficace dans l'année culturale en cours. Un ajustement de la fertilisation permettra souvent de corriger le déséquilibre nutritionnel pour l'année suivante. Bien que cette méthode présente certains avantages (simplicité de la mise en œuvre, méthode non destructrice, faible coût, etc.), elle possède de nombreuses limitations: le déséquilibre nutritionnel n'est pas quantifié, ce qui ne permet pas d'ajuster précisément le plan de fumure. De plus, il est souvent difficile d'interpréter la cause de la carence ou de l'excès (faible disponibilité dans le sol de l'élément en question, antagonisme avec un autre élément, etc.).

L'analyse en laboratoire des teneurs en éléments nutritifs permet d'établir un diagnostic complet de l'état nutritionnel de la culture. Les teneurs totales en macro- et micro-

éléments sont le plus souvent déterminées, mais dans certains cas, les analyses ne concernent que certaines formes spécifiques des éléments [par ex.  $\text{NO}_3^-$  pour l'azote (N),  $\text{SO}_4^{2-}$  pour le soufre (S)], car elles peuvent refléter plus précisément le statut de nutrition des plantes pour ces éléments (Marschner 2012). En fonction du type de culture en place (plantes annuelles ou pérennes), l'analyse de plantes pourra concerner toute la partie aérienne de la plante, les feuilles, les constituants spécifiques des feuilles (pétioles, limbes, nervures) ou encore les fruits. Les analyses en laboratoire nécessitent un investissement financier et un travail relativement important (préparation et envoi des échantillons, coût de l'analyse, etc.), mais cette méthode reste la plus fiable pour caractériser précisément l'état de nutrition de la plante pour chaque élément. Dans le cadre de la gestion de la fertilisation azotée, elle peut aussi permettre d'ajuster les prochains apports en fonction du stade de développement des végétaux au moment du prélèvement des échantillons. Pour les autres éléments, l'ajustement de la fertilisation s'effectuera en prévision des années à venir.

Dans le cas spécifique d'une conduite dynamique de la fertilisation azotée, des méthodes d'analyse photométriques, basées sur une estimation de la teneur en chlorophylle des feuilles, sont développées depuis quelques décennies (Piekielek et Fox 1992; Schepers *et al.* 1992). Un appareil de mesure [par ex. Minolta SPAD meter (Soil Plant Analysis Development, Minolta Camera Co., Osaka, Japan) ou Yara N tester (Yara International, Oslo, Norway)] réalise une mesure de la réflexion et de l'absorption d'un ou plusieurs faisceaux lumineux au niveau de la feuille. A partir de cette mesure, une teneur en chlorophylle est déduite. La teneur en chlorophylle étant directement liée à la teneur en N des feuilles des végétaux, sa mesure permet d'analyser si la culture est actuellement carencée en N ou non. Toutefois, cette technique ne permet pas de déterminer si la nutrition azotée est excessive, car les plantes cessent de produire de la chlorophylle à partir d'un certain seuil (Schepers *et al.* 1992). Cette technique présente de nombreux avantages lorsque l'on souhaite adapter ses apports azotés au fur et à mesure: elle est simple à mettre en œuvre, immédiate et non destructrice. Il est donc possible

Tableau 1. Synthèse des principales analyses de plantes pour les différentes cultures.

Culture	Analyses possibles	Interprétation des résultats
Grandes cultures	Teneurs totales (macro- et micro-éléments)	Valeurs indicatives
	Teneur en nitrate de la sève	Indice de nutrition
	Teneur en chlorophylle	
Prairies et pâturages	Teneurs totales en macroéléments	Indice de nutrition
Arboriculture	Observation des symptômes	Identification des symptômes
	Teneurs totales (macro- et micro-éléments)	Valeurs indicatives
Viticulture	Observation des symptômes	Identification des symptômes
	Teneurs totales (macro- et micro-éléments)	Valeurs indicatives
	Teneur en chlorophylle	
Cultures maraîchères	Teneur en nitrate de la sève	Valeurs indicatives

de répéter les mesures sur une même plante au cours de la saison afin de surveiller la nutrition azotée des cultures en différents points de la parcelle. Par ailleurs, de récentes études (Prost et Jeuffroy 2007) montrent que ce type de mesure permet aussi de quantifier l'indice de nutrition azoté des cultures (concept détaillé dans la suite de ce chapitre). Le tableau 1 synthétise les analyses de plantes usuellement pratiquées en fonction du type de culture.

Dès qu'une analyse de plantes est envisagée, il est essentiel de contacter à l'avance le laboratoire d'analyse afin de s'informer de la procédure concernant le prélèvement, la préparation et l'envoi des échantillons. Certains laboratoires ou certaines analyses imposent un protocole particulier. Par exemple, dans le cas d'une analyse de sève, on recommande de prélever les échantillons en début de matinée car la teneur en nitrate fluctue au cours de la journée du fait de l'exposition lumineuse (Neely *et al.* 2010). De plus, les quantités de matériel végétal exigées pour analyse peuvent varier d'un laboratoire à un autre.

Lors du prélèvement des échantillons de plantes, deux stratégies d'échantillonnage peuvent être envisagées. Si l'on souhaite caractériser le statut nutritionnel de la parcelle de façon générale, il faudra alors s'assurer que l'échantillonnage est représentatif de la parcelle. Pour cela, on recommande généralement de prélever des plants dans une zone où la croissance de la culture en place est uniforme et représentative de la parcelle. Si des échantillons de sol sont également prélevés, les deux zones de prélèvement doivent coïncider. Si un déséquilibre nutritionnel ne concerne qu'une partie de la parcelle, il est alors possible d'effectuer un échantillonnage spécifique des plantes carencées et des plantes «saines» afin de réaliser une analyse comparative. Il est alors recommandé de prélever aussi des échantillons de sol provenant des deux zones distinctes pour compléter l'analyse de plantes.

Afin de garantir la fiabilité des analyses, il est important de préparer correctement les échantillons, selon les exigences du laboratoire. Il est généralement recommandé de les faire sécher pendant quelques temps à l'air libre ou de les stocker au réfrigérateur (pour quelques jours seulement). Lors de l'envoi ou du dépôt des échantillons, ceux-ci doivent être placés dans des sachets en papier ou dans des filets en nylon, dûment étiquetés selon les recommandations du laboratoire. Le conditionnement en sachets plastiques est souvent proscrit afin d'éviter tout risque de pourrissement.

#### 4. Interprétation des résultats d'analyses de plantes

La méthode d'interprétation des analyses de plantes la plus répandue se rapporte à l'usage de valeurs indicatives, établies pour chaque culture à différents stades de développement. Ces valeurs sont le fruit de différents essais à partir desquels des teneurs caractéristiques de conditions de culture optimales ont été déterminées. L'usage de valeurs indicatives est pratiqué pour les grandes cultures (ta-

bleau 2), en cultures maraîchères (module 10), en viticulture (module 12) et en arboriculture (module 13). Ces valeurs indicatives peuvent aussi être demandées aux laboratoires d'analyses.

L'interprétation des analyses de plantes pour les herbages et les grandes cultures peut aussi être réalisée à partir du calcul d'un indice de nutrition (IN). Le concept de l'IN a été développé et introduit par Lemaire *et al.* (1989) afin de définir le statut nutritionnel des prairies. Il a ensuite été étendu à d'autres types de cultures (Justes *et al.* 1994; Colnenne *et al.* 1998; Plénet et Lemaire 2000). Cet indice se base sur une valeur critique déterminée dans des essais de référence (Ulrich 1952), à partir de la relation décrivant la dilution d'un élément en fonction de la biomasse (Salette et Lemaire 1981; Greenwood *et al.* 1990). La valeur critique est définie comme étant la teneur minimale requise pour un élément donné permettant d'obtenir un rendement maximal (figure 1). Cette teneur est jugée optimale car elle maximise l'efficacité d'utilisation de l'élément en question. L'indice de nutrition (IN) peut être calculé selon l'équation suivante:

$$IN_X = \frac{[X]_{mes}}{[X]_{crit}} \times 100 [\%]$$

Où  $[X]_{mes}$  et  $[X]_{crit}$  sont respectivement la concentration mesurée et la concentration critique de l'élément X pour une biomasse donnée.

L'intérêt d'utiliser une concentration critique dépendant de la biomasse réside dans le fait qu'elle permet de caractériser l'état de nutrition d'une culture pendant toute la période de croissance. La littérature donne des équations

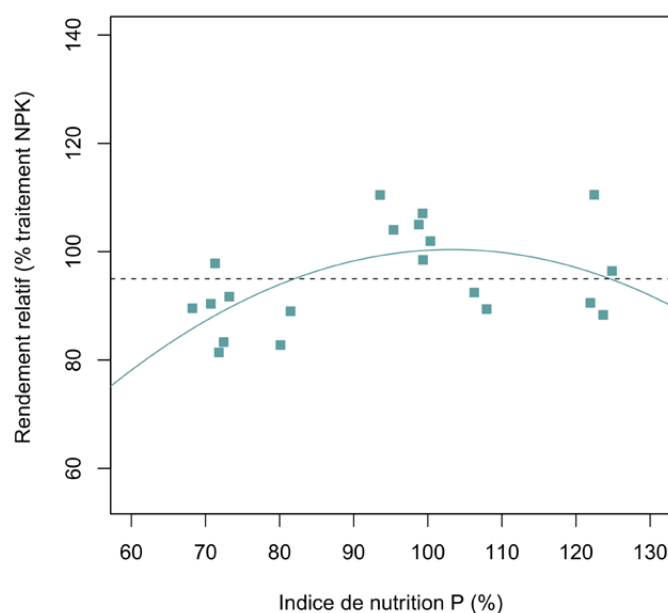


Figure 2. Rendement relatif en fonction de l'indice de nutrition du P pour du blé d'automne cultivé à Changins (Cadot *et al.* sous presse). Un rendement relatif de 100% correspond au rendement obtenu avec une fertilisation NPK telle que préconisée par les DBF (Sinaj *et al.* 2009).

Tableau 2. Valeurs indicatives pour les teneurs en macro-éléments de quelques grandes cultures.

Culture	Partie prélevée	Stade		N	P	K	Ca	Mg	S
		Echelle BBCH	Description						
[g kg <sup>-1</sup> MS <sup>1</sup> ]									
Céréales	Plante entière (partie aérienne)	13–29	Stade 3 feuilles à fin de tallage	40,0–50,0	2,0–5,0	25,0–50,0	2,0–10,0	1,4–10,0	1,5–6,5
	Feuille supérieure	30–39	Elongation de la tige	40,0–50,0	2,0–5,0	25,0–50,0	2,0–10,0	1,4–10,0	1,5–6,5
	Feuille supérieure	40–90	Epi en formation à récolte (maturité)	40,0–50,0	2,0–5,0	20,0–40,0	2,0–10,0	1,4–10,0	1,5–6,5
Maïs	Plante entière (partie aérienne)	< 19	Jeune plantule (moins de 10 cm)	40,0–50,0	4,0–6,0	30,0–40,0	3,0–8,0	2,0–6,0	1,8–5,0
	Feuille supérieure	19–52	Elongation de la tige au début de l'inflorescence	30,0–40,0	3,0–5,0	20,0–30,0	2,5–8,0	1,5–6,0	1,5–4,0
	Feuille adjacente à l'épi supérieur	53–69	Inflorescence à fin de floraison	28,0–40,0	2,5–5,0	18,0–30,0	2,5–8,0	1,5–6,0	1,5–6,0
Colza	Feuille adjacente à l'épi supérieur	89	Récolte (maturité)	25,0–35,0	2,5–4,0	16,0–25,0	2,0–8,0	1,2–5,0	1,2–4,0
	Feuille supérieure	50–59	Inflorescence	40,0–64,0	4,2–6,9	35,0–51,0	21,0–30,0	1,5–6,2	6,5–9,0
	Feuille supérieure	10–29	Début de croissance	35,0–55,0	3,0–6,0	17,0–25,0	11,0–22,0	0,3–6,0	–
Soja	Feuille supérieure	60–69	Floraison	32,5–50,0	3,0–6,0	15,0–22,5	8,0–14,0	2,5–7,0	2,5–6,0
	Limbes de la 4 <sup>e</sup> feuille	11–42	Début de saison (croissance et formation des tubercules)	60,0–80,0	6,0–9,0	50,0–70,0	15,0–25,0	2,5–7,5	2,0–4,0
	Limbes de la 4 <sup>e</sup> feuille	43–45	Mi-saison (croissance des tubercules)	50,0–70,0	4,0–6,0	35,0–50,0	15,0–25,0	2,5–7,5	2,0–4,0
Tournesol	Limbes de la 4 <sup>e</sup> feuille	47–49	Saison tardive (maturation des tubercules)	40,0–60,0	2,0–4,0	25,0–35,0	15,0–25,0	2,5–7,5	2,0–4,0
	Feuilles supérieures	51–69	Inflorescence et floraison	20,0–35,0	2,5–5,0	15,0–30,0	3,0–20,0	2,0–15,0	2,0–4,0
	Limbes des feuilles médianes	31–39	Croissance des parties aériennes	30,0–45,0	1,5–8,0	12,5–60,0	6,0–15,0	2,0–25,0	1,8–2,5

<sup>1</sup> MS: matière sèche.

Les gammes de valeur indiquées correspondent à un statut nutritionnel optimal. Les données sont adaptées de Campbell *et al.* (2000) et American Agricultural Laboratory (2013).

Tableau 3. Équations des concentrations critiques du N et du P pour quelques grandes cultures.

Culture	Concentration critique en N ( $N_C$ )	Concentration critique en P ( $P_C$ )
Blé d'automne	$N_C = 5,35 \times MS^{-0,44}$ (Justes <i>et al.</i> 1994)	$P_C = 4,44 \times MS^{-0,41}$ $P_C = 0,083N + 0,88$ (Cadot <i>et al.</i> sous presse)
Blé de printemps	$N_C = 3,85 \times MS^{-0,57}$ (Ziadi <i>et al.</i> 2010)	$IN_N > 80\%$ : $P_C = 0,94 + 0,107 N$ $IN_N < 80\%$ : $P_C = 1,70 + 0,092 N$ (Ziadi <i>et al.</i> 2008)
Colza d'automne	$N_C = 4,48 \times MS^{-0,25}$ (Colnenne <i>et al.</i> 1998)	$P_C = 5,18 \times MS^{-0,39}$ $P_C = 0,657N + 1,67$ (Cadot <i>et al.</i> sous presse)
Lin	$N_C = 4,69 \times MS^{-0,53}$ (Flénet <i>et al.</i> 2006)	
Maïs	$N_C = 3,40 MS^{-0,391}$ (Hermann et Taube 2004)	$P_C = 3,49 \times MS^{-0,18}$ $P_C = 0,083N + 0,39$ (Cadot <i>et al.</i> sous presse)
Orge d'automne	$N_C = 4,76 \times MS^{-0,39}$ (Zhao 2014)	
Tournesol	$N_C = 4,53 \times MS^{-0,42}$ (Debaeke <i>et al.</i> 2012)	

Les concentrations en N et P sont exprimées en % de la matière sèche (MS). Les valeurs de MS sont exprimées en t ha<sup>-1</sup>. Les équations fournies par Cadot *et al.* (sous presse) ont été établies en conditions suisses (Changins, VD), ce qui n'est pas le cas pour les autres équations.

permettant d'estimer la concentration critique en N ( $N_C$ ) ou en P ( $P_C$ ) pour certaines cultures, en particulier pour quelques grandes cultures (tableau 3). Les concentrations critiques pour les prairies sont présentées dans le module relatif aux herbages (module 9).

Il est généralement admis qu'un indice de nutrition inférieur à 80 % reflète des conditions de manque qui nécessitent une correction de la fertilisation à la hausse, tandis qu'un indice supérieur à 120 % est révélateur de conditions d'excès. Ces seuils peuvent être ajustés par culture à partir d'essais permettant d'établir précisément la relation entre rendement et état nutritionnel des plantes, comme l'illustre la figure 2 pour du blé d'automne cultivé à Changins. Dans cet exemple, des indices de nutrition du P variant de 82 à 124 % ont permis d'obtenir au moins 95 % du rendement de référence réalisé avec une fertilisation NPK optimale (Cadot *et al.* sous presse).

Les concentrations critiques pour le phosphore ( $P_C$ ) sont généralement exprimées en fonction de la teneur en N de la biomasse (Duru et Théliet-Huché 1997; Farruggia *et al.* 2000; Bélanger *et al.* 2015). Le modèle utilisant la relation  $P_C$ -N est plus universel que le modèle utilisant la relation  $P_C$ -matière sèche (tableau 3) car (i) les mêmes paramètres du modèle peuvent être utilisés indépendamment des conditions pédoclimatiques du site (Bélanger *et al.* 2015) et (ii) il ne nécessite pas la détermination de la biomasse mais seulement des teneurs en nutriments, ce qui le rend plus pratique.

L'établissement des courbes de référence pour chaque culture est un objectif important de la recherche agronomique actuelle et l'utilisation des indices de nutrition est amenée à se généraliser.

## 5. Complémentarité entre analyses de plantes et analyses de sol

L'analyse de plantes permet d'évaluer *a posteriori* si la disponibilité en éléments nutritifs du sol suffit à couvrir les besoins nutritionnels d'une culture, tandis que l'analyse de sol a l'avantage de permettre une planification *a priori* de la fertilisation.

A l'instar des relations entre le rendement d'une culture et la teneur en éléments nutritifs dans la plante (indices de nutrition), la relation entre le rendement d'une culture et la teneur d'un élément nutritif dans le sol, par exemple le P disponible, peut servir à établir le seuil critique pour interpréter cette teneur, c'est-à-dire la teneur minimale dans le sol qui permet d'atteindre 95 % au moins du rendement obtenu avec une fertilisation NPK optimale. Dans un essai de longue durée situé à Changins, où le sol présente un pH neutre (pH-H<sub>2</sub>O = 6,8) et des teneurs en argile et en matière organique de respectivement 54 % et 5 %, Cadot *et al.* (sous presse) ont mis en évidence des seuils critiques pour P-NaHCO<sub>3</sub> (Olsen *et al.* 1954), P-AAE10 et P-CO<sub>2</sub> (Agroscope 1996) de respectivement 11,9, 10,0 et 0,3 mg kg<sup>-1</sup> pour le maïs grain, de 14,7, 12,1 et 0,3 mg kg<sup>-1</sup> pour le blé d'automne et de 15,6, 15,2 et 0,8 pour le colza (figure 3). Selon la version précédente des recommandations (Sinaj *et al.* 2009), de telles teneurs en P-AAE10 auraient conduit, pour les conditions de cet essai, à une augmentation de la norme de fertilisation P. Ces résultats soulignent la nécessité pour la recherche d'étudier ces seuils critiques pour d'autres conditions pédoclimatiques et d'autres cultures, avant de pouvoir généraliser le conseil de fertilisation sur la base de relations précises entre les teneurs en nutriments disponibles dans le sol, les teneurs dans les plantes et les rendements des cultures.

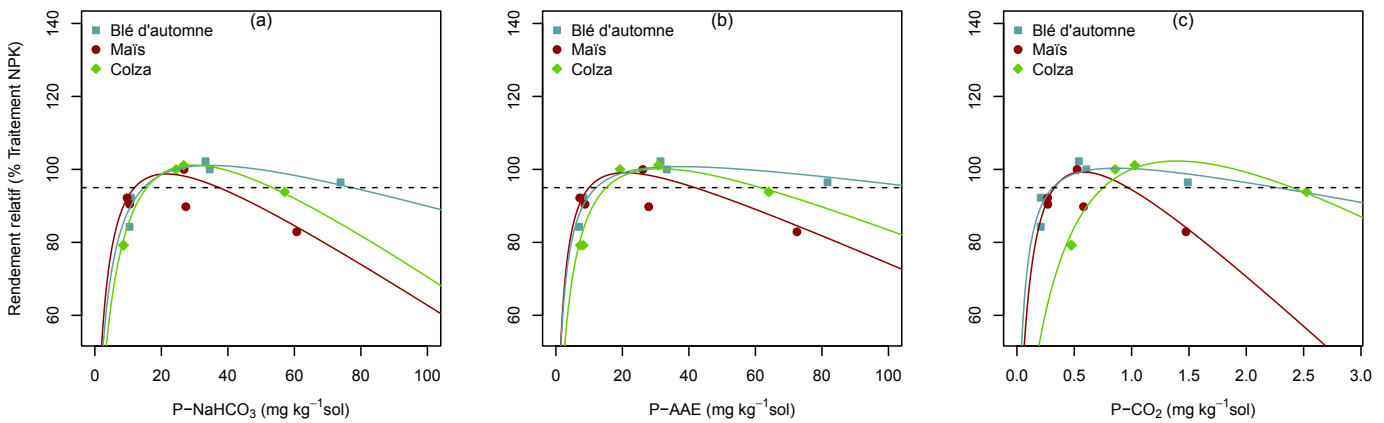


Figure 3. Rendement relatif du blé d'automne, du maïs grain et du colza en fonction du P disponible dans le sol (Cadot et al. sous presse). Ces courbes ont été établies dans les conditions pédoclimatiques de Changins. Trois méthodes d'extraction différentes ont été employées pour l'évaluation du P disponible: (a) méthode  $\text{NaHCO}_3$  ( $\text{P-NaHCO}_3$ , internationalement reconnue), (b) méthode AAE10 ( $\text{P-AAE}$ ) et (c) méthode  $\text{H}_2\text{O-CO}_2$  ( $\text{P-CO}_2$ ) (b & c: méthodes de référence utilisées en Suisse). Un rendement relatif de 100 % correspond au rendement obtenu avec une fertilisation NPK telle que préconisée par les DBF (Sinaj et al. 2009).

## 6. 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.
- American Agricultural Laboratory, 2013. Plant Tissue Interpretative Guidelines. Accès: [www.olsenlab.com](http://www.olsenlab.com).
- Asher C. J. & Loneragan J. F., 1967. Response of plants to phosphate concentration in solution culture. I. Growth and phosphorus content. *Soil science* 103, 225–233.
- Bélangier G., Ziadi N., Pageau D., Grant C., Lafond J. & Nyiraneza J., 2015. Shoot Growth, Phosphorus-Nitrogen Relationships, and Yield of Canola in Response to Mineral Phosphorus Fertilization. *Agronomy Journal* 107, 1458–1464.
- Cadot S., Bélangier G., Ziadi N., Morel C. & Sinaj S., 2017. Yield response and critical plant and soil phosphorus for wheat, maize, and rapeseed after 44 years of phosphorus fertilization. *Agric. Ecosyst. Environ.* (in press).
- Campbell C. R. (ed), 2000. Reference Sufficiency Ranges for Plant Analysis in the Southern Region of the United States. Southern Cooperative Series Bulletin 394. Version mise à jour en 2013. Accès: <http://www.ncagr.gov/agronomi/saaesd/scsb394.pdf> [4. 5. 2017].
- Colnenne C., Meynard J. M., Réau R., Justes E. & Merrien A., 1998. Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Oilseed Rape. *Annals of Botany* 81, 311–317.
- Debaeke P., van Oosterom E. J., Justes E., Champolivier L., Merrien A., Aguirrezabalaga L.A.N., González-Dugo V., Massingnam A.M. & Montemurro F., 2012. A species-specific critical nitrogen dilution curve for sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Field Crops research* 136, 76–84.
- Duru M. & Théliier-Huché L., 1997. N and P-K status of herbage: use for diagnosis of grasslands. In: INRA (Ed.), Diagnostic Procedures for Crop N Management and Decision Making, Paris (Les Colloques n° 82), 125–138.
- Farruggia A., Théliier-Huché L., Violleau S., Lebrun J. M. & Besnard A., 2000. L'analyse d'herbe pour piloter la fertilisation phosphatée et potassique des prairies. Exemples d'application de la méthode. *Fourrages* 164, 447–459.
- Flénet F., Guéris M., Boiffin J., Dorvillez D., Champolivier L., 2006. The critical N dilution curve for linseed (*Linum usitatissimum* L.) is different from other C3 species. *European Journal of Agronomy* 24, 367–373.
- Greenwood D. J., Lemaire G., Gosse G., Cruz P., Draycott A. & Neeteson J. J., 1990. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. *Annals of Botany* 66, 425–436.
- Hermann A. & Tube F., 2004. The Range of the Critical Nitrogen Dilution Curve for Maize (*Zea mays* L.) Can Be Extended Until Silage Maturity. *Agronomy Journal* 96, 1131–1138.
- Justes E., Mary B., Meynard J.-M., Machet J.-M. & Théliier-Huché L., 1994. Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Wheat Crops. *Annals of Botany* 74, 397–407.
- Lemaire G., Gastal F. & Salette J., 1989. Analysis of the effect of N nutrition on dry matter yield of a sward by reference to potential yield and optimum N content. In: Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Grassland Congress. Nice. France. 179–180.
- Marschner P., 2012. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Troisième édition. Editions Academic Press, London, UK. 672 p.
- Neely H. L., Koenig R. T., Miles C. A., Koenig T. C. & Karlsson M. G., 2010. Diurnal Fluctuation in Tissue Nitrate Concentration of Field-grown Leafy Greens at Two Latitudes. *HortScience* 45 (12), 1815–1818.
- Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe F. S. & Dean L. A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. In U.S. Dept. of Agric., Circ. 939, Washington DC.
- Piekielek W. P & Fox R. H., 1992. Use of a chlorophyll meter to predict sidedress nitrogen requirements for maize. *Agronomy Journal* 84, 59–65.

- Plénet D. & Lemaire G., 2000. Relationships between dynamics of nitrogen uptake and dry matter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration. *Plant and Soil* 216, 65–82.
- Prost L. & Jeuffroy M.-H., 2007. Replacing the nitrogen nutrition index by the chlorophyll meter to assess wheat N status. *Agronomy for Sustainable Development* 27, 321–330.
- Reuter D. & Robinson J.B. 1997. *Plant analysis: An Interpretation Manual*. Deuxième édition. Editions CSIRO, Australie. 450 p.
- Salette J. & Lemaire G., 1981. Sur la variation de la teneur en azote des Graminées fourragères pendant leur croissance: formulation d'une loi de dilution. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* 292 (III), 875–878.
- Schepers J. S., Blackmer T. M. & Francis D. D., 1992. Predicting N Fertilizer Needs for Corn in Humid Regions: Using Chlorophyll Meters. In: Bock B.R. & Kelley K.R. (ed.), *Predicting N fertilizer needs for corn in humid regions*. Bull. Y-226. National Fertilizer and Environmental Research Center, Muscle Shoals, USA.
- Sinaj S., Richner W., Flisch R. & Charles R., 2009. Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages (DBF-GCH). *Rev. suisse Agric.* 41, 1–98.
- Ulrich A., 1952. Physiological bases for assessing the nutritional requirements of plants, *Annual Review of Plant Physiology* 3, 207–228.
- Ziadi N., Bélanger G., Cambouris A.N., Tremblay N., Nolin M.C. & Claessens A., 2008. Relationship between Phosphorus and Nitrogen Concentrations in Spring Wheat. *Agronomy Journal* 100, 80–86.
- Ziadi N., Bélanger G., Claessens A., Lefebvre I., Cambouris A.N., Tremblay N., Nolin M.C. & Parent L.E., 2010. Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Spring Wheat. *Agronomy Journal* 102, 241–250.
- Zhao B., 2014. Determining of a critical dilution curve for plant nitrogen concentration in winter barley. *Field Crops Research* 160, 64–72.

## 7. Liste des tableaux

Tableau 1. Synthèse des principales analyses de plantes pour les différentes cultures. ....	3/4
Tableau 2. Valeurs indicatives pour les teneurs en macroéléments de quelques grandes cultures. ....	3/6
Tableau 3. Équations des concentrations critiques du N et du P pour quelques grandes cultures. ....	3/7

## 8. Liste des figures

Figure 1. Courbe théorique du rendement de culture en fonction de la teneur d'un élément nutritif dans les tissus de la plante. ....	3/3
Figure 2. Rendement relatif en fonction de l'indice de nutrition du P pour du blé d'automne cultivé à Changins. ....	3/5
Figure 3. Rendement relatif du blé d'automne, du maïs grain et du colza en fonction du P disponible dans le sol. ....	3/8





## 4/ Propriétés et utilisation des engrais

Walter Richner <sup>1</sup>, René Flisch <sup>1</sup>, Jochen Mayer <sup>1</sup>, Patrick Schlegel <sup>2</sup>, Michael Zähler <sup>3</sup> et Harald Menzi <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Agroscope, 8046 Zurich, Suisse

<sup>2</sup> Agroscope, 1725 Posieux, Suisse

<sup>3</sup> Agroscope, 8356 Ettenhausen, Suisse

Renseignements: [walter.richner@agroscope.admin.ch](mailto:walter.richner@agroscope.admin.ch)

## Table des matières

1. Introduction .....	4/3
2. Les engrais de ferme .....	4/3
2.1 Introduction .....	4/3
2.2 Production d'engrais de ferme et teneurs en éléments nutritifs .....	4/3
2.3 Disponibilité de l'azote dans les engrais de ferme .....	4/8
2.4 Traitement des engrais de ferme .....	4/9
2.5 Utilisation des engrais de ferme .....	4/12
3. Engrais de recyclage et produits de méthanisation .....	4/12
3.1 Introduction .....	4/12
3.2 Teneur en éléments nutritifs dans les engrais de recyclage et les produits de méthanisation .....	4/13
3.3 Indications générales pour l'utilisation des composts et des produits de méthanisation issus d'installations artisanales et industrielles .....	4/13
4. Engrais minéraux .....	4/14
4.1 Introduction .....	4/14
4.2 Principales propriétés des engrais minéraux .....	4/14
4.3 Effet des engrais minéraux sur le sol .....	4/18
5. Bibliographie .....	4/18
6. Liste des tableaux .....	4/20
7. Liste des figures .....	4/20
8. Liste des annexes .....	4/20
9. Annexes .....	4/21

## 1. Introduction

Selon le concept de fertilisation en agriculture (PRIF; Sinaj et Richner 2017) (figure 2, module 1), les besoins des cultures en éléments nutritifs sont couverts par les éléments prélevés des réserves du sol, par ceux qui proviennent de la décomposition des résidus de récolte, ainsi que, subsidiairement, par les engrais. Une utilisation optimale des éléments nutritifs par les plantes ne peut être atteinte que moyennant une bonne connaissance de leurs possibilités d'utilisation et en tenant compte des techniques culturales, ainsi que des aspects environnementaux. Il s'agit, en priorité, de bien connaître les quantités d'engrais de ferme disponibles ainsi que leurs teneurs en éléments nutritifs, de même pour les engrais de recyclage et les engrais minéraux. Des indications sur les propriétés fertilisantes de ceux-ci sont nécessaires, comme par exemple la rapidité d'action, les teneurs en éléments indésirables, ainsi que les effets spécifiques sur le sol. Ce module est dévolu à ces informations.

## 2. Les engrais de ferme

### 2.1 Introduction

Dans de nombreuses exploitations, les éléments nutritifs contenus dans les engrais de ferme (lisier/purin et fumier) couvrent une bonne partie des besoins des cultures. Il est donc essentiel, dans les exploitations avec bétail, de bien gérer les engrais de ferme, tant du point de vue de la nutrition des plantes que du point de vue économique et écologique (module 7). La valorisation ciblée des engrais de ferme n'est pas sans difficultés: les quantités d'engrais sont généralement importantes, leurs teneurs en éléments nutritifs sont relativement faibles et difficiles à quantifier, les pertes d'éléments nutritifs peuvent être importantes selon les conditions, principalement sous forme d'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ). De plus, la disponibilité des différentes fractions de l'azote (N) contenu dans les engrais de ferme est difficilement prévisible, notamment celle de N lié à la matière organique. Les valeurs indicatives constituent généralement le seul moyen d'évaluer les quantités d'engrais de ferme produites et leurs teneurs; à ceci s'ajoutent les plus ou moins grandes différences d'une exploitation à l'autre. En prenant en compte la variabilité des flux d'éléments nutritifs et en appliquant les recommandations générales concernant l'utilisation des engrais de ferme, les valeurs indicatives constituent néanmoins un bon instrument pour une valorisation optimale des engrais de ferme, tant au point de vue agronomique que du point de vue écologique.

### 2.2 Production d'engrais de ferme et teneurs en éléments nutritifs

#### 2.2.1 Données de base et méthodes de calcul

Dans les excréments des animaux de ferme, on retrouve une bonne partie des éléments nutritifs contenus dans les fourrages qu'ils ont ingérés (figure 1). Selon les éléments nutritifs produits, l'espèce animale, le mode d'affouragement,

le niveau de production et l'état de santé des animaux, la proportion des éléments excrétés par rapport à ceux qui ont été ingérés peut varier entre 50 % et 100 % dans une exploitation agricole. En utilisant les excréments des animaux comme engrais, le cycle des éléments nutritifs au sein de l'exploitation est néanmoins en bonne partie fermé.

Toutes les données concernant les quantités d'éléments nutritifs excrétés par les animaux de rente et les teneurs y relatives dans les engrais de ferme sont basées sur des calculs de bilans, à savoir: ingestion par les fourrages moins la rétention dans le corps de l'animal, le lait ou les œufs. Ces calculs sont établis sur la base de plans d'affouragement avec différentes rations ainsi que sur des relevés dans différentes exploitations. Ils prennent ainsi en compte l'état actuel des techniques de production dans la pratique. Les besoins en éléments nutritifs des animaux de rente sont tirés des Apports alimentaires recommandés (Agroscope 2015, 2016). Les teneurs et les valeurs nutritives du fourrage sont issues des références Agroscope (2017). Les teneurs en éléments nutritifs des corps d'animaux, du lait et des œufs sont présentées dans le tableau 1.



Figure 1. Une valorisation des éléments nutritifs contenus dans les excréments des animaux qui soit à la fois conforme aux besoins des plantes et ménage l'environnement est un défi pour les exploitations avec bétail (photo: Harald Menzi, Agroscope).

En considérant les pertes de N à l'étable, en cours de stockage, lors de l'épandage et sachant que le N lié à la matière organique n'est pas disponible en totalité, les quantités de N contenu dans les engrais de ferme épandus ne peuvent pas être entièrement prises en compte comme éléments nutritifs. C'est pourquoi, on différencie le N total ( $N_{\text{tot}}$ ; mesurable analytiquement; voir la définition dans l'annexe 1), le N soluble ( $N_{\text{sol}}$ ; mesurable analytiquement; voir la définition dans l'annexe 1) et le N disponible pour les plantes en bonnes conditions de production ( $N_{\text{disp}}$ ; déterminé sur la base de résultats issus de nombreuses années d'essais; mesurable analytiquement; voir la définition dans l'annexe 1). En général, on admet que 60 % du  $N_{\text{tot}}$  contenu dans les engrais de ferme, toutes espèces d'animaux de rente confondues, est dispo-

nible pour les plantes à moyen terme. En tenant compte des pertes inévitables à l'étable et pendant le stockage, la disponibilité effective de la quantité de N excrétée par les animaux se situe autour de 50 %.

### 2.2.2 Les déjections des animaux de rente

Le tableau 2 présente les quantités d'éléments nutritifs contenues dans les déjections des animaux de rente par place d'animal et par année en conditions de production moyennes. Toutes ces données se rapportent aux déjections animales, litière non comprise, pour une intensité de production moyenne et un affouragement conforme aux recommandations d'Agroscope (Agroscope 2015, 2016). Pour des calculs spécifiques à certains types d'exploitations, d'éventuelles différences par rapport aux valeurs de référence peuvent être corrigées d'après les indications présentées dans le tableau 3. Les données utilisées pour les calculs sont documentées dans l'annexe 2.

**Tableau 1. Teneurs en éléments nutritifs des corps d'animaux, du lait et des œufs.** Ces valeurs sont prises en compte dans les calculs de bilans pour déterminer les quantités d'éléments nutritifs dans les déjections.

Type d'animal/produit	Teneur en éléments nutritifs (g/kg de poids vif, g/l de lait, g/kg d'œufs)						
	N	P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K	K <sub>2</sub> O	Mg	Ca
Vache laitière	25	6,0	14	1,6	1,9	0,50	11,6
Veau	24	5,9	14	1,6	1,9	0,35	11,0
Taureau à l'engrais	28	7,0	16	2,1	2,5	0,40	13,0
Mouton	22	6,0	14	1,2	1,4	0,30	11,0
Chèvre	21	5,3	12	1,5	1,8	0,35	9,0
Porcelet	25	5,3	12	2,3	2,9	0,34	8,3
Porc, accroissement (25–120 kg)	26	5,4	12	2,3	2,8	0,30	8,0
Porc à l'engrais, truie <sup>1</sup>	25	5,1	12	2,2	2,7	0,30	8,0
Volaille	29	5,8	13	2,6	3,1	0,30	10,0
Lait	5,5	1,0	2,3	1,6	1,9	0,10	1,2
Oeufs	18	1,8	4,2	1,2	1,4	0,50	33,0

<sup>1</sup> La truie n'est en général pas prise en compte dans les bilans.

**Tableau 2. Valeurs indicatives des quantités d'éléments nutritifs dans les fèces et l'urine de différents animaux de rente.**

Des données pour d'autres animaux de rente sont consignées dans l'annexe 3.

Type d'animal/type de production		Éléments nutritifs excrétés annuellement en kg par unité (animal ou place animal)							Consommation de fourrage de base (dt matière sèche/an)
		N	P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K	K <sub>2</sub> O	Mg	Ca	
Vache laitière	Production annuelle: 7'500 kg <sup>1</sup>	112	17	39	143	172	14	36	56
Vache allaitante <sup>2</sup>	Races lourdes (> 700 kg)	95	14	31	131	158	10	30	50
	Races moyennes (600–700 kg)	85	12	28	117	141	9,0	27	45
	Races légères (< 600 kg)	72	10	24	98	118	8,0	23	38
	Génisse d'élevage <sup>A1</sup>	Moins de 1 an	25	3,3	7,5	29	35	4,0	10
Veau à l'engrais <sup>A2</sup>	1 à 2 ans	40	5,7	13	50	60	5,0	15	22
	Plus de 2 ans	55	8,7	20	62	75	7,0	23	33
	Par place	18	3,1	7,1	9,4	11	1,1	7,0	1,0
Veau de vache allaitante <sup>A3</sup>	Par animal engraisé	5,5	0,9	2,1	2,8	3,4	0,3	2,1	0,3
	Jusqu'à env. 350 kg/animal engraisé	22	3,1	7,0	20	24	1,3	3,8	6,0
Bovin à l'engrais (65–530 kg) <sup>A4</sup>	Jusqu'à env. 220 kg/animal engraisé	9,0	1,4	3,2	5,5	6,6	0,6	1,5	1,0
	Age max. 160 j., par place	23	2,2	5,0	19	23	1,3	2,9	6
Bovin engraisé au pâturage (65–530 kg) <sup>A5</sup>	Age > 160 jours, par place	49	5,7	13	34	42	4,2	15	21
		40	5,2	12	46	55	4,0	13	16
Taureau d'élevage		50	7,9	18	70	85	5,0	20	30
Jument avec poulain <sup>A6</sup>		52	13	31	73	88	7	23	29
Autre cheval <sup>A7</sup>	De plus de 3 ans	44	10	23	62	75	5	19	29
	Poulain	42	8	18	56	67	4	14	26
Place de chèvre <sup>3</sup>		17	2,5	5,7	20	24	1,5	6,5	7,5
Place de mouton <sup>3, A8</sup>		18	2,6	6,0	21	25	2,0	7,0	8
Place de mouton laitier <sup>3</sup>		20	3,7	8,5	24	29	2,1	7,4	9
Porc à l'engrais/remonte <sup>4, A9</sup>	Par place	13	2,3	5,3	4,8	5,8	1,4	3,3	0
	Par animal produit	3,9	0,7	1,6	1,5	1,8	0,40	1,0	0
Truie d'élevage <sup>5, A10</sup>	Par place	44	9,2	21	19	23	4,2	11	0
	Verrat	18	4,4	10	8,0	9,6	1,5	6,0	0
Truie allaitante <sup>A10</sup>	Par place	49	10	23	15	18	4,4	12	0
	Par truie et rotation	5,0	1,0	2,3	1,5	1,8	0,40	1,2	0
Truie gestante <sup>5, A10</sup>	Par place	25	6,5	15	14	16	2,3	8,5	0
	Par truie et rotation	8,3	2,2	5,1	4,6	5,5	0,80	2,9	0
Porcelet sevré <sup>5, A10</sup>	Par place	3,9	0,73	1,7	1,9	2,3	0,50	0,70	0
	Par porcelet élevé	0,41	0,08	0,17	0,20	0,24	0,05	0,08	0

Tableau 2 (suite)

Type d'animal/type de production		Éléments nutritifs excrétés annuellement en kg par unité (animal ou place animal)						Consommation de fourrage de base (dt matière sèche / an)	
		N	P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K	K <sub>2</sub> O	Mg		Ca
Poule pondeuse <sup>6, A11</sup>	Par 100 places	80	20	46	25	30	6,5	100	0
Poulette <sup>A12</sup>	Par 100 places	30	7,4	17	10	12	2,5	11	0
	Par 100 animaux élevés	13	3,3	7,5	4,5	5,4	1,1	5	0
Poulet à l'engrais <sup>7, A13</sup>	Par 100 places	36	6,0	13	18	22	4,4	4	0
Dinde à l'engrais <sup>8</sup>	Par 100 places	140	31	70	33	40	18	35	0
	Par 100 animaux engraisés	48	11	25	11	13	6,5	12	0

Notes<sup>1-8</sup> voir tableau 3; notes<sup>A1-A13</sup> voir annexe 2.

**Tableau 3. Notes se rapportant au tableau 2 avec les données pour une attribution correcte des catégories ou pour des corrections spécifiques à des exploitations qui sont importantes pour le calcul des flux d'éléments nutritifs.**  
D'autres notes sur les bases des calculs d'éléments nutritifs dans les déjections figurent dans l'annexe 2.

Note du tableau 2	Type d'animal/type de production	Description du type de production
1	Vache laitière	Production laitière annuelle moyenne: 7'500 kg; poids vif adulte moyen: 660 kg. Pour les calculs: par 1'000 kg de production en moins, les déjections diminuent (-5 % de N, -7 % de P [P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ], -3 % de K [K <sub>2</sub> O], -7 % de Mg et -6 % de Ca) tandis que la consommation de fourrage de base baisse de 1,5 %; par 1'000 kg de production en plus, les déjections augmentent d'autant, de même que la consommation de fourrage de base. Cette correction prend aussi les différences de poids vif en compte.
2	Vache allaitante	Vache allaitante avec 1 veau; les valeurs admises pour les déjections se rapportent à la vache sans veau. Pour les vaches avec plus d'un veau, on peut prendre les valeurs de la catégorie de poids supérieure. Races lourdes: poids vif moyen de 720 à 800 kg au stade adulte (p. ex. Limousin, Blonde d'Aquitaine, Charolais) Races moyennes: 600 à 700 kg (p. ex. Brune suisse, Simmental, Angus, croisement F1) Races légères: 500 à 550 kg (p. ex. Galloway, vache grise rhétique, Hérens).
3	Place mouton ou chèvre	Mères, y compris la remonte des animaux d'élevage, jeunes animaux en finition d'engraissement et part pour le bélier ou le bouc.
4	Place porc à l'engrais	La quantité de P dans les déjections est basée sur une teneur de 5,2 g de P par kg d'aliment (14 MJ <sup>1</sup> EDP <sup>2</sup> par kg d'aliment; aliment standard sans réduction de la teneur en N et en P [NPr] ou alimentation par phases). A une différence de 1 g P/kg correspond un supplément ou une réduction d'environ 30 %. La quantité de N dans les déjections est calculée pour une teneur en matière azotée (MA) de 170 g par kg d'aliment (14 MJ EDP par kg d'aliment). Un écart de 10 g MA/kg par rapport à la valeur standard entraîne un supplément ou une réduction de 9 % dans les déjections. Des données plus détaillées pour faire les calculs des déjections en cas d'utilisation d'aliments aux teneurs en N et en P réduites sont contenues dans les modules complémentaires 6 et 7 du Suisse-Bilanz (Agridea et OFAG 2016).
5	Truie d'élevage	Par place de porc d'élevage et par an, la quantité de N et de P dans les déjections est calculée pour une teneur moyenne en matière azotée (MA) de 173 g/kg et une teneur en P de 5,8 g/kg (aliment combiné pour truies à raison de 61 % et 39 % d'aliment pour porcelets). A 10 g de réduction de la teneur en MA correspond une diminution de 8 % des quantités de N dans les déjections et, par gramme de réduction des teneurs en P, s'ensuit une diminution de 24 % de P. Pour une production séparée (à savoir aliments différents pour truies allaitantes et truies portantes), on a pris comme base une teneur en MA de 145 g/kg d'aliment pour truies portantes, de 180 g/kg d'aliment pour truies allaitantes et de 177 g/kg d'aliment pour porcelets. On a admis 6 g P/kg pour les truies (portantes ou allaitantes) et pour les porcelets 5,7 g P/kg. A 10 g de réduction de la teneur en MA correspond une réduction de la quantité de N dans les déjections de 6 % pour les truies portantes, de 8 % pour les truies allaitantes et de 12 % pour les porcelets. Pour chaque g de teneur en P en moins, la réduction des quantités de P dans les déjections est de 18 % pour les truies portantes, de 23 % pour les truies allaitantes et de 40 % pour les porcelets. Des données plus détaillées pour faire les calculs des déjections en cas d'utilisation d'aliments aux teneurs en N et en P réduites sont contenues dans les modules complémentaires 6 et 7 du Suisse-Bilanz (Agridea et OFAG 2016).
6	Poule pondeuse	La quantité de P dans les déjections est basée sur une teneur de 5,7 g P/kg d'aliment. A une différence de 1 g P/kg correspond un supplément ou une réduction d'environ 20 %.
7	Poulet à l'engrais	Pour le calcul des déjections, on peut s'appuyer sur le module complémentaire 7 du Suisse-Bilanz «Bilan import/export» de l'Office fédéral de l'agriculture OFAG et d'Agridea en tenant compte des entrées et sorties d'animaux. Ce calcul est obligatoire pour les exploitations dont l'effectif moyen dépasse 3'000 bêtes.
8	Dinde à l'engrais	Les calculs se basent sur un poids moyen en fin d'engraissement de 12 kg et sur 2,8 rotations par année. Dans le cas de places de dindes en pré-engraissement (jusqu'à environ 1,5 kg de poids vif et 6 rotations par année), on peut calculer, pour 100 places par année, 40 kg N, 9 kg P et 10 kg K dans les déjections. Pour la deuxième phase d'engraissement (de 1,5 à 13 kg de poids vif et 2,9 rotations par année), les quantités correspondantes pour 100 places sont de 230 kg N, 50 kg P et 58 kg K.

<sup>1</sup> Mégajoule.

<sup>2</sup> Energie digestible pour le porc.

Pour les bovins et les petits ruminants, les références proviennent de la Banque de données sur le trafic des animaux (BDTA) sans prise en compte de la durée de vide sanitaire. Pour les porcs et la volaille, le vide sanitaire entre les rotations a été pris en compte dans les données par place d'animal et par an (annexe 2).

Pour certaines catégories d'animaux, avec des rotations clairement délimitées (donc sans production couvrant l'année entière), on peut aussi se référer aux données par animal produit.

Des données concernant la consommation de fourrage de base et les déjections d'autres catégories d'animaux se trouvent dans l'annexe 3.

### 2.2.3 Production d'engrais de ferme

L'affouragement détermine la quantité de déjections animales et, par conséquent, les quantités de fumier et de lisier/purin produites. Les valeurs indicatives sur les quantités de fumier et de lisier/purin produites selon les animaux de rente et pour différents systèmes de stabulation figurent dans le tableau 4. Elles servent en premier lieu au dimensionnement des volumes de stockage nécessaires pour les engrais de ferme et, subsidiairement, à une esquisse de planification de la fertilisation.

Selon le système de stabulation, il n'est produit que du lisier/purin, du fumier et du lisier/purin ou uniquement du fumier. Pour la stabulation entravée ou la stabulation

**Tableau 4. Quantités indicatives d'engrais de ferme produits annuellement par différentes espèces d'animaux de rente dans différents systèmes de stabulation.**

	Type d'animal/type de production	Production d'engrais de ferme et utilisation de paille par année <sup>1</sup> selon le système de stabulation <sup>2</sup>					
		Lisier seul <sup>3</sup> (m <sup>3</sup> )	Purin/fumier <sup>3, 4</sup>			Fumier seul <sup>4</sup>	
			Paille utilisée (dt/an)	Purin (m <sup>3</sup> )	Fumier (t)	Paille utilisée (dt/an)	Fumier (t)
1	Vache laitière, production 7'500 kg/an <sup>5</sup>	23	6,8	11	8,9	30	21
1	Vache allaitante, lourde <sup>6</sup>	19	5,0	9,4	7,6	25	18
1	mi-lourde <sup>6</sup>	17	5,0	8,7	6,7	25	16
1	légère <sup>6</sup>	15	5,0	7,0	5,7	25	13
1	Génisse d'élevage, moins de 1 an	4,8	1,5	2,4	2,0	8,0	4,6
1	Génisse d'élevage, 1 à 2 ans	8,0	2,5	4,0	3,2	12	7,6
1	Génisse d'élevage, plus de 2 ans	12	3,5	5,4	4,4	16	10
1	Place de veau à l'engrais					4,2	3,2
1	Veau de vache allaitante, jusqu'à env. 350 kg	4,1	1,3	2,0	1,6	4,2	3,8
1	Veau de vache allaitante, jusqu'à env. 220 kg	1,6	0,6	0,8	0,6	2,4	1,5
1	Place bovin à l'engrais, jusqu'à 160 j	4,5	selon le type de stabulation <sup>7</sup>			11,0	5,0
1	âge > 160 j	10	selon le type de stabulation <sup>7</sup>			16	11
1	Cheval (fumier frais)					29	12 <sup>8</sup>
1	Jument avec poulain, jusqu'à 0,5 an (fumier frais)					36	14 <sup>8</sup>
1	Poulain, 0,5 à 2,5 ans (fumier frais)					15	10 <sup>8</sup>
1	Place chèvre					3,7	1,7
1	Place mouton					3,7	1,7
1	Place brebis laitière					3,7	2,3
1	Place porc à l'engrais	1,6	selon le type de stabulation <sup>7</sup>			2,6	1,2
1	Place truie d'élevage	7,5	selon le type de stabulation <sup>7</sup>			8,0	4,2
1	Place truie après mise bas	8,2	selon le type de stabulation <sup>7</sup>			10	3,5
1	Place truie portante	5,5	selon le type de stabulation <sup>7</sup>			6,0	2,3
1	Place porcelet	0,6	selon le type de stabulation <sup>7</sup>			1,0	0,3
				Fosse à crottes/ Elevage au sol			
100	Places poules pondeuses	2,7		1,5			
100	Places poulettes	1,0		0,6			
100	Places poulets à l'engrais			0,8			
100	Places dindes à l'engrais			3,0			

libre, on peut s'attendre aux mêmes quantités d'engrais de ferme. Les quantités usuelles de litière et les pertes en cours de stockage sont incluses dans les quantités de fumier indiquées. Les pertes au stockage peuvent varier selon le type de fumier, le mode de stockage et les conditions climatiques. Il en résulte que les quantités de fumier effectives peuvent s'écarter des valeurs indicatives.

Les données présupposent une occupation continue des étables. En cas d'absences temporaires (pâturation), les quantités de fumier et de lisier/purin doivent être réduites proportionnellement au temps passé à la pâturation (figure 2). Exemple: pour 200 jours de pâturation à raison de 8 h/j, le calcul est le suivant:

$$(200 \times 8) / (365 \times 24) \times 100 \rightarrow \text{réduction de } 18,3 \%$$

Les quantités d'engrais de ferme indiquées se rapportent à une intensité de production moyenne (tableau 3 et annexe 2); pour une intensité de production plus élevée, la quantité produite est en conséquence plus élevée.

Les données du tableau 4 se rapportent à du lisier/purin non dilué. Dans la plupart des exploitations, des quantités d'eau non négligeables peuvent s'écouler dans la fosse à lisier/purin: eau de lavage des étables, eau de rinçage de la chambre à lait, eau de pluie de places non couvertes, eau usée du ménage, etc. La quantité effective de lisier/purin non dilué ne peut être déterminée que si l'on connaît les quantités d'eau qui s'écoulent dans la fosse. Des valeurs indicatives figurent dans le tableau 5. Le taux de dilution usuel est de 1:1 (une part de lisier/purin:une part d'eau). Pour éviter des pertes importantes de N lors de l'épandage par temps chaud, il est recommandé d'augmenter la dilution (volatilisation du  $\text{NH}_3$ ; tableau 2, module 7).

#### Notes pour le tableau 4, p. 4/6

<sup>1</sup> En cas d'absence temporaire de l'étable (pâturation, alpage), les quantités d'engrais de ferme doivent être réduites en fonction des jours d'absence. Les quantités se rapportent à un niveau de production moyen. Pour une intensité de production supérieure, les quantités d'engrais de ferme produites sont d'autant plus élevées.

<sup>2</sup> Selon le système de stabulation, il n'est produit que du lisier/purin, du fumier et du lisier/purin ou uniquement du fumier. Pour les stabulations entravées et les stabulations libres, les calculs sont établis avec les mêmes quantités. Dans les quantités de fumier indiquées, les pertes durant le stockage sont incluses. Ces dernières peuvent varier selon le type de fumier, le mode de stockage et les conditions climatiques. Pour ces raisons, la quantité de fumier peut différer de la valeur indicative.

Pour le fumier en tas et le fumier de stabulation (voir annexe 1), on peut admettre un poids volumique de 700–800 kg/m<sup>3</sup>. Le fumier chargé sur l'épandeur au chargeur frontal ou à la grue pèse 550–650 kg/m<sup>3</sup> sur le véhicule, chargé à la fourche, 700–800 kg/m<sup>3</sup>. Ces indications ne sont pas valables pour un fumier contenant une forte proportion de restes de fourrages ou d'autres déchets organiques, ni pour du fumier ne contenant que des fèces raclées sans litière (étable d'alpage). Pour s'adapter à des conditions d'exploitation spécifiques, il est conseillé de peser plusieurs épandeurs normalement chargés.

<sup>3</sup> A côté du type de bétail, le genre de lisier/purin dépend de la proportion de fèces qu'il contient. Les quantités de lisier/purin se rapportent à un produit non dilué. L'adjonction d'eau usée doit être prise en compte selon les données du tableau 5. Usuellement, on admet une dilution 1:1 (une part de lisier/purin pour une part d'eau).

<sup>4</sup> Le type et la qualité du fumier dépendent de la quantité de litière et la proportion de fèces et d'urine qu'il contient. Beaucoup de litière et/ou peu de bouse raclée donne un fumier paillu. En termes de poids, l'influence de la quantité de litière influence peu la quantité de fumier produit.

<sup>5</sup> Le calcul est fondé sur une production annuelle de 7'500 kg de lait. Pour chaque tranche de 1'000 kg de différence en plus ou en moins, les valeurs sont à modifier de +/- 5%. Ces corrections tiennent compte des différences de poids vif.

<sup>6</sup> Animaux lourds: > 700 kg  
Animaux mi-lourds: 600 à 700 kg  
Animaux légers: < 600 kg

<sup>7</sup> Dans ce genre de stabulation, il y a en général du lisier sur une partie de la surface, du fumier sur l'autre. Les proportions peuvent être estimées en fonction des surfaces correspondant à chacun des produits. Ceux-ci sont à considérer au même titre que du lisier et du fumier de stabulation libre. Exemple: stabulation avec 60% de surface en litière et 40% de caillebotis: calculer avec 60% de fumier de stabulation et 40% de lisier.

<sup>8</sup> Les valeurs indiquées se basent sur du fumier frais de cheval (stocké moins d'un mois). En cas de stockage et de fermentation plus longs (plus de trois mois), les valeurs indicatives peuvent être divisées par deux.

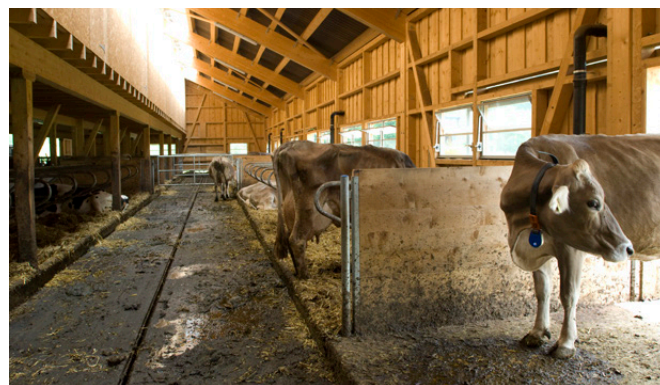


Figure 2. En cas d'absence temporaire de l'étable, les quantités d'engrais de ferme doivent être réduites en fonction des jours d'absence des vaches (photo: Gabriela Brändle, Agroscope).

#### 2.2.4 Teneurs en éléments nutritifs dans les engrais de ferme

Les valeurs indicatives relatives aux teneurs moyennes en éléments nutritifs des différentes sortes de lisier/purin et de fumier sont contenues dans le tableau 6. Pour le lisier/purin, c'est la valeur du produit non dilué qui est indiquée. Pour déterminer les teneurs dans un lisier/purin dilué, il faut tenir compte de la quantité d'eau ajoutée selon les indications contenues dans le tableau 5:

Teneur lisier/purin dilué	=	Teneur lisier/purin non dilué (parts de lisier/purin non dilué + parts d'eau)
---------------------------	---	--

L'affouragement influence la teneur en éléments nutritifs des engrais de ferme. Toutefois, les valeurs indicatives sont fixées de manière à permettre des corrections uniquement en cas de conditions particulières (annexe 2), par exemple en agriculture bio, lorsque la teneur en potassium (K) du fourrage diffère sensiblement de la valeur de référence ou que la teneur en phosphore (P) des rations pour porcs et

**Tableau 5. Valeurs indicatives pour le calcul des quantités d'eaux usées déversées dans la fosse à lisier/purin (OFEV et OFAG 2011).**

La quantité d'eau utilisée par unité de gros bétail (UGB) peut varier fortement. Seul un compteur d'eau peut permettre une mesure précise pour l'exploitation.

Provenance des eaux usées	Unité de référence	Quantité en m <sup>3</sup> /mois		Quantité en m <sup>3</sup> /an
		Été	Hiver	
<b>Bovins</b>				
Eau pour le nettoyage de l'étable et des soins aux animaux <sup>1</sup>	UGB	1,0	0,2	7,0
Evacuation des déjections par flottation <sup>2</sup>	UGB	0,5	0,5	6,0
<b>Porcins</b>				
Eau pour le nettoyage de la porcherie et des soins aux animaux <sup>3</sup>	PPE <sup>9</sup>	0,04		0,5
<b>Volaille</b>				
Eau pour le nettoyage des poulaillers de poules pondeuses <sup>3</sup>	1'000 PP <sup>10</sup>	0,2		2,5
Eau pour le nettoyage des poulaillers de volaille à l'engrais <sup>3</sup>	1'000 PE <sup>11</sup>	0,4		5,0
Jus d'écoulement de la <b>fumière</b> , des <b>aires d'exercice</b> imperméabilisées et exposées à la pluie, des <b>plateformes de silo-couloirs</b> exposées à la pluie, dont toutes les eaux sont évacuées vers la fosse à lisier/purin, etc.	m <sup>2</sup> et 100 mm de précipitations	0,1		1,2
<b>Plateformes de silo-couloirs</b> exposées à la pluie dont les eaux sont évacuées par une rigole à jus de silo <sup>4</sup>	m <sup>2</sup> et 100 mm de précipitations	0,025		0,3
<b>Eaux de lavage</b>				
Chambre à lait	Postes de traite (PT)	0,5 + 0,05 × PT		6 + 0,6 × PT
Citerne de refroidissement <sup>5</sup>	Volume de la citerne (L)	0,0015 × L		0,018 × L
Installation de traite à pots	Poste de traite (PT)	3 + 0,5 × PT		36 + 6 × PT
Installation de traite directe (salle de traite ou étable à stabulation entravée)	Poste de traite (PT)	4 + 0,5 × PT		48 + 6 × PT
Stalles dans la salle de traite <sup>6</sup>	Stalle (S)	0,5 × S		6 × S
Installation de traite automatique <sup>7</sup>	Unité	25		300
<b>Eaux usées domestiques<sup>8</sup></b>				
Conditions usuelles (lave-linge, douche/bain et WC)	Habitant	5,0		60
Installations sanitaires simples	Habitant	3,5		42
Cas particuliers avec quantités d'eaux usées régulièrement inférieures à la normale	Habitant	2,0		24

<sup>1</sup> La quantité d'eau indiquée suffit en général pour le bon fonctionnement de l'évacuation continue du lisier/purin avec bec de retenue.

<sup>2</sup> Cette quantité est généralement ajoutée à celle du nettoyage normal des étables. Elle est nécessaire au bon fonctionnement du système et, par conséquent, ne peut guère être réduite durant l'hiver.

<sup>3</sup> En l'absence d'un nettoyeur à haute pression, la quantité d'eau est considérablement plus grande. De l'eau de nettoyage n'est en principe produite qu'au terme d'une série.

<sup>4</sup> Les eaux pluviales non polluées recueillies sur la plateforme du silo sont évacuées vers une installation d'infiltration.

<sup>5</sup> Dans le cas d'un nettoyage journalier.

<sup>6</sup> Par stalle sur quai y compris le nettoyage de la fosse de traite. Carrousel de traite: il faut tenir compte des indications du fabricant.

<sup>7</sup> 0,5 à 0,8 litre d'eau usée par kg de lait et par an. Dans certains cas, la quantité peut être encore plus élevée.

<sup>8</sup> Il faut vérifier que l'écoulement des eaux usées aboutisse réellement dans la fosse lisier/purin selon les indications de l'OFEV et OFAG (2011).

<sup>9</sup> Place de porc à l'engrais.

<sup>10</sup> Places de poules pondeuses.

<sup>11</sup> Places de poulets à l'engrais.

volaille se révèle plus élevée qu'en production classique à cause de l'interdiction des phytases. Le conditionnement des engrais de ferme peut modifier sensiblement les teneurs en éléments nutritifs (chapitre 2.4).

### 2.3 Disponibilité de l'azote dans les engrais de ferme

Partout où l'on stocke ou épand des engrais de ferme, il y a des pertes de N, essentiellement sous forme de NH<sub>3</sub>. Pour les pertes inévitables à l'étable et pendant le stockage, on compte normalement 20 % du N contenu dans les déjections chez les bovins en stabulation libre, 15 % en stabulation entravée; chez les porcs, ce sont 20 % de pertes et 30 à 50 % pour la volaille. Pour le calcul des valeurs indicatives des teneurs relatives aux engrais de ferme des bovins (tableau 6), on s'est basé sur les pertes inévitables des stabulations libres.

Lors de l'épandage de lisier/purin ou de fumier, il y a également des pertes de N par volatilisation du NH<sub>3</sub>. Il faut ajouter qu'une partie du N dans le lisier/purin et le fumier est liée à la matière organique; il n'est de ce fait pas immédiatement disponible pour les plantes. Ce N s'intègre donc à la matière organique du sol et ce n'est qu'après un long processus de métabolisation par minéralisation – qui peut s'étaler sur plusieurs années pour certaines fractions – qu'il devient disponible pour les plantes. Le moment et l'intensité du processus de minéralisation sont très difficiles à évaluer. Le N<sub>disp</sub> dans les engrais de ferme correspond à la quantité de N<sub>disp</sub> pour les plantes sur une période d'environ trois ans, dans le cas d'une gestion optimale des engrais de ferme. Il contient une part de N<sub>sol</sub> qui, après un épandage soigné avec peu de pertes, est rapidement à disposition des plantes; une autre partie n'est disponible qu'à moyen terme (deux à



**Tableau 6. Teneurs indicatives en matière sèche (MS), en matière organique (MO) et en éléments nutritifs des engrais de ferme pour différentes espèces d'animaux de rente en stabulation.**

Type d'engrais de ferme/Type d'animal	Teneurs (kg/m <sup>3</sup> de lisier/purin non dilué et kg/t de fumier)										
	MS	MO	N <sub>tot</sub> <sup>3</sup>	N <sub>sol</sub> <sup>3</sup>	N <sub>disp</sub> <sup>3</sup>	P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K	K <sub>2</sub> O	Mg	Ca
<b>Vache/bovin d'élevage</b>											
Lisier <sup>1</sup>	90	70	3,9	2,1	2,0–2,7	0,74	1,7	6,2	7,5	0,61	1,5
Purin <sup>1</sup>	75	40	4,5	2,9	2,9–3,8	0,47	1,1	9,0	11	0,58	1,0
Fumier au tas <sup>2</sup>	190	150	4,5	0,7	0,9–1,8	1,3	3,0	5,1	6,1	0,93	3,0
Fumier de stabulation libre <sup>2</sup>	210	175	4,9	1,2	1,2–2,5	0,94	2,2	8,4	10	0,82	2,2
<b>Bovin d'engraissement</b>											
Lisier <sup>1</sup>	90	65	4,0	2,1	2,0–2,8	0,55	1,3	3,7	4,5	0,37	1,2
Fumier de stabulation libre <sup>2</sup>	210	155	4,1	1,0	1,0–1,8	0,57	1,3	4,4	5,3	0,42	1,5
<b>Veau</b>											
Fumier de veau <sup>2</sup>	200	150	5,0	1,9	1,3–2,5	1,1	2,5	4,7	5,7	0,89	1,7
<b>Cheval</b>											
Fumier de cheval frais <sup>2</sup>	350	300	4,4	1,2	0,3–0,8	1,1	2,5	8,1	9,8	0,6	2,5
Fumier de cheval mûr <sup>2</sup>	350	240	6,8	0,7	0,7–1,8	2,2	5,0	16,2	19	1,3	5,0
<b>Mouton/chèvre</b>											
Fumier de mouton/chèvre <sup>2</sup>	270	200	8,2	2,4	3,3–4,9	1,6	3,7	14	17	1,3	4,9
<b>Porc</b>											
Lisier de porc, engrais <sup>1, 4</sup>	50	36	6,5	4,6	3,3–4,6	1,4	3,2	3,0	3,6	0,88	2,1
Lisier de porc d'élevage <sup>1, 5</sup>	50	33	4,7	3,3	2,4–3,4	1,2	2,7	2,5	3,0	0,56	1,5
Fumier de porc <sup>2</sup>	270	230	8,8	2,6	3,5–5,3	2,9	6,6	6,0	7,3	1,5	5,0
<b>Volaille</b>											
Crottes de poules/poulettes (tapis à crottes) <sup>2</sup>	350	250	21	6,3	8,4–13	7,4	17	9,3	11	2,4	37
Fumier de poule/poulette (Fosse à crottes, élevage au sol) <sup>2</sup>	500	330	26	7	11–16	13	30	17	20	4,3	67
Fumier de poulet <sup>2, 6</sup>	650	440	32	10	13–19	7,5	17	23	28	5,5	5
Fumier de dinde <sup>2</sup>	600	400	28	7,5	12–18	10	23	10,8	13	6,0	12

<sup>1</sup> Les teneurs du lisier/purin se rapportent à du lisier/purin non dilué. Les dilutions provenant de l'apport d'eaux usées doivent être prises en compte selon le tableau 5. Exemple avec une dilution 1:1,5 (part de lisier/purin:part d'eau): teneur du lisier/purin non dilué / (1 + 1,5).

<sup>2</sup> Sauf indication contraire, les valeurs se rapportent à du fumier moyennement décomposé (annexe 1).

<sup>3</sup> Pour les données sur les formes et les pertes de N, voir chapitre 2.3.

<sup>4</sup> Des détails à propos de la note 4 se trouvent dans le tableau 3.

<sup>5</sup> Des détails à propos de la note 5 se trouvent dans le tableau 3.

<sup>6</sup> Valable indépendamment de la durée d'engraissement dans les systèmes les plus courants.

trois ans après l'épandage de l'engrais de ferme); ensemble, ces deux fractions représentent la quantité de N dans la matière qui est minéralisable. Le tableau 7 indique l'effet moyen de différents engrais de ferme durant l'année d'épandage et l'effet de ce N à moyen terme.

Pour les parcelles qui reçoivent régulièrement des engrais de ferme, on peut directement prendre en considération les valeurs de la première colonne du tableau 7; on admet, par cette simplification, que l'arrière-effet des apports d'engrais de ferme antérieurs peut être pris en compte. En production fourragère, il faut choisir plutôt la valeur supérieure, et pour les grandes cultures la valeur inférieure. Pour estimer la quantité de N dans le lisier/purin disponible l'année d'épandage, on peut se baser sur la teneur en N ammoniacal (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N). Ce N peut être déterminé à la ferme avec suffisamment de précision au moyen d'un test rapide (chapitre 2.5.2). La différence entre le N<sub>tot</sub> épandu et le N<sub>disp</sub> dans les engrais de ferme correspond aux pertes de NH<sub>3</sub> survenues après l'épandage et à la part de N lié à la matière

organique qui est stocké dans le sol sous la forme de substance organique (humus) pendant une longue période.

Si les engrais de ferme ne sont pas épandus à une période optimale (figure 3) (en automne, après la fin de la période de végétation, par des conditions météorologiques défavorables ou un mauvais état du sol, etc.), l'efficacité du N peut être nettement moindre. Il en résulte qu'une partie du N<sub>disp</sub> non utilisé va se perdre par lixiviation, ruissellement ou volatilisation. Ces pertes de N chargent l'environnement et doivent donc être réduites au maximum. De plus, c'est une perte économique s'il faut remplacer ce N perdu par de l'engrais.

## 2.4 Traitement des engrais de ferme

### 2.4.1 Fermentation anaérobie

Un lisier/purin qui a subi une fermentation anaérobie (sans contact avec de l'air) voit ses propriétés modifiées par rapport à du lisier/purin non fermenté et il y a lieu d'en tenir

Tableau 7. Proportion de  $N_{disp}$  à moyen terme et durant l'année de l'épandage dans différents engrais de ferme.

Type d'engrais de ferme	$N_{disp}$ à moyen terme en % de la teneur en $N_{tot}$ <sup>1</sup>	$N_{disp}$ l'année de l'épandage en % de la teneur en $N_{tot}$ <sup>2</sup>	
		Cultures fourragères	Grandes cultures
Lisier (bovin)	50–70	55	45
Purin de bovin	65–85	70	60
Fumier au tas	20–40 <sup>3</sup>	20	15
Fumier de stabulation libre	25–50 <sup>3</sup>	25	20
Fumier de cheval	10–25 <sup>3</sup>	15	10
Fumier de mouton/chèvre	40–60 <sup>3</sup>	40	30
Lisier de porc	50–70	60	50
Fumier de porc	40–60 <sup>3</sup>	4	35
Crottes de poules (tapis roulant)	40–60 <sup>3</sup>	4	40
Fumier de poule (fosse à crottes, élevage au sol)	40–60 <sup>3</sup>	4	35
Fumier de volaille (engraissement), poulet, dinde	40–60 <sup>3</sup>	4	35

<sup>1</sup> Ce niveau de disponibilité peut être atteint par une valorisation optimale des engrais de ferme et ceci dans la moyenne des conditions pédo-logiques et climatiques de la Suisse. Il inclut la disponibilité à court terme et l'arrière-effet durant les années qui suivent (voir aussi la définition de  $N_{disp}$  dans l'annexe 1).

Pour les parcelles qui reçoivent régulièrement des engrais de ferme, ces valeurs de disponibilité peuvent être prises en compte pour le calcul de la fumure, car l'arrière-effet est automatiquement pris en compte. Dans les cas d'apports sporadiques de fumier, l'action du N peut être répartie sur deux à trois ans. Pour le lisier/purin, cette différenciation n'a guère de sens.

En cultures fourragères, il faut prendre en compte plutôt la valeur supérieure, tandis que pour les grandes cultures, il faut choisir la valeur inférieure.

<sup>2</sup> Disponibilité du N l'année de l'épandage en conditions optimales et de moindres pertes. Le reste du N est minéralisé au cours des années qui suivent. La minéralisation dépend fortement des conditions du sol et du climat. Selon le moment de la minéralisation, l'effet de la libération du N peut être agronomique ou écologique (rendement et qualité des plantes ou pertes) (voir aussi la définition de  $N_{disp}$  dans l'annexe 1).

<sup>3</sup> Dans les sols avec un taux d'argile supérieur à 30 %, on ne peut guère compter plus que la valeur inférieure de la fourchette pour la disponibilité à moyen terme, souvent elle est encore sensiblement plus basse. Dans ces conditions, la disponibilité au cours de l'année de l'épandage est aussi moindre.

<sup>4</sup> L'utilisation de ce type d'engrais de ferme n'est pas recommandée sur les prairies naturelles.

compte pour la fertilisation des cultures. La fermentation du lisier/purin dans une installation de méthanisation décompose la matière organique et réduit la teneur en matière organique ainsi que la viscosité. De ce fait, le lisier/purin est plus liquide et pénètre plus facilement dans le sol lors de l'épandage, ce qui permet de réduire les pertes de N par volatilisation.

La décomposition de la matière organique du lisier/purin durant la fermentation entraîne une minéralisation du N lié à la matière organique qui libère du  $NH_4^+$ . Il y a donc une augmentation de la concentration en N ammoniacal dans le lisier/purin fermenté et une diminution du N lié à la matière organique. Il en résulte une plus grande disponibilité du N du lisier/purin pour les plantes qui rend le calcul de l'effet fertilisant du lisier/purin plus facile.

Au cours de l'année d'épandage, la valeur fertilisante azotée des liquides issus d'installations de biogaz agricoles vaut au moins celle des engrais de ferme (tableau 7). Par l'augmentation de la teneur en  $NH_4^+$  et la diminution simultanée des composés carbonés facilement utilisables par les microorganismes, le rapport carbone (C):N est plus étroit et il en résulte une moindre immobilisation du N ammoniacal dans le sol. Il s'ensuit en général une meilleure utilisation du N l'année de l'épandage pour autant que celui-ci ait été réalisé de manière à minimiser les pertes (p. ex. au moyen d'une rampe à pendillards). L'efficacité azotée du lisier/purin fermenté (seul ou avec d'autres sub-

strats) est augmentée de 10 à 25 % (Bosshard *et al.* 2010; Möller et Müller 2012; Webb *et al.* 2013).

Le pH du lisier/purin augmente pendant la fermentation, car une partie du N lié à la matière organique est transformée en  $(NH_4)_2CO_3 \cdot H_2O$  (carbonate d'ammonium). Cependant, cette augmentation du pH et de la teneur en N ammoniacal augmente les pertes potentielles de N par volatilisation en cas de stockage et d'épandage inadéquats.

#### 2.4.2 Séparation solides/liquides

Ce procédé mécanique sépare les parties solides du lisier (qui contiennent le P à action lente) de la partie liquide, le purin clair, qui contient entre autres des éléments nutritifs solubles à action rapide. Cette séparation confère au purin clair les avantages suivants par rapport au lisier qui n'a pas été séparé:

- réduction du volume;
- pas de couche flottante, donc en général il n'est pas nécessaire de brasser avant l'épandage;
- pas de bouchons dans le système d'épandage;
- écoulement rapide de la surface des plantes;
- meilleure infiltration dans le sol;
- moins d'émissions de  $NH_3$ ;
- amélioration de l'efficacité du N.

Il y a néanmoins un désavantage: il faut deux volumes de stockage, dont un couvert pour la phase liquide.

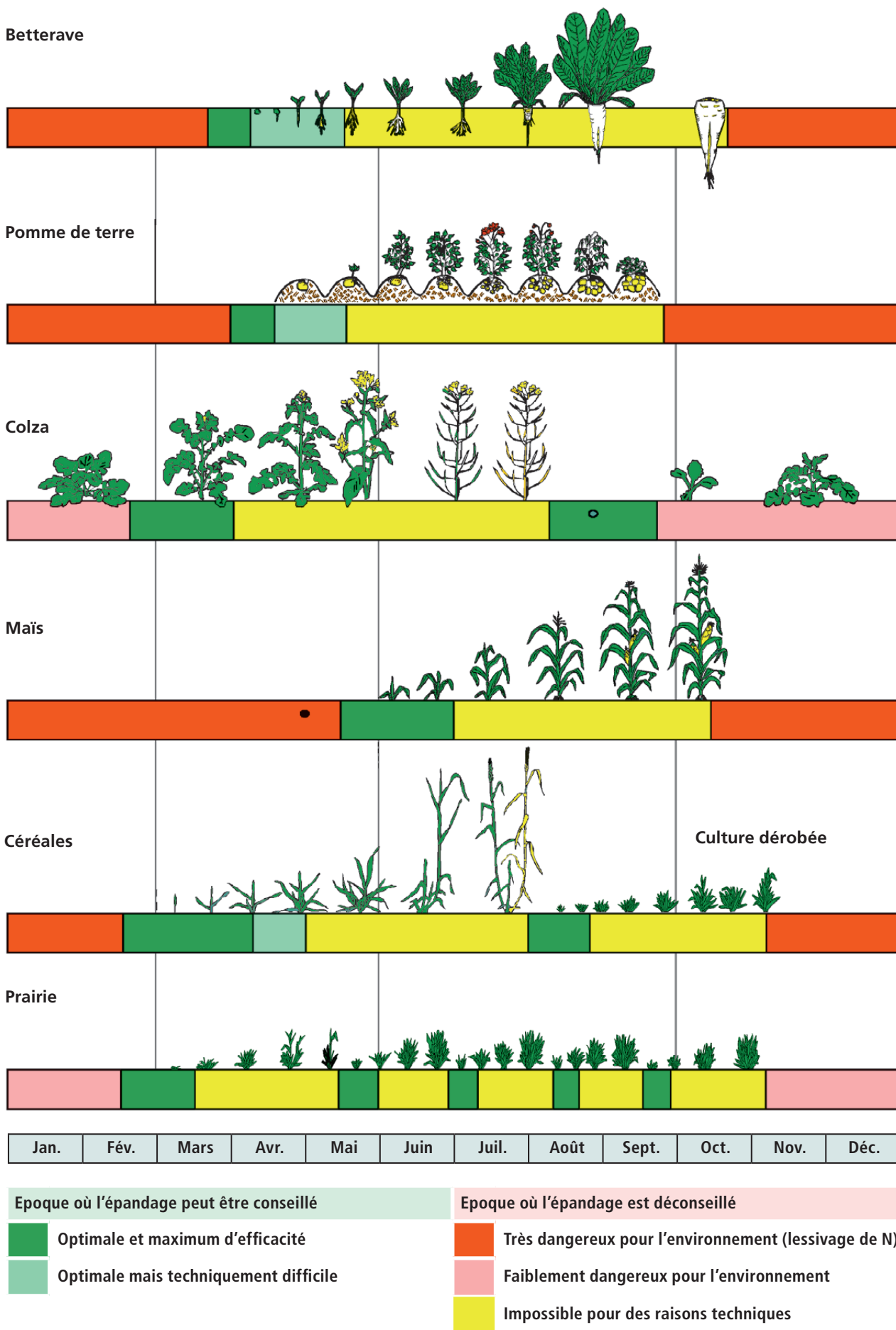


Figure 3. Représentation schématique des possibilités d'épandage du lisier/purin en fonction du développement des cultures et des risques pour l'environnement. Le calendrier doit être adapté en fonction du site.

Le purin clair peut être utilisé tant en grandes cultures qu'en cultures fourragères. La partie solide peut être utilisée comme engrais en grandes cultures, mélangée avec du compost ou composté (pour une teneur en MS supérieure à 25 %).

### 2.4.3 Additifs au lisier/purin

Les additifs au lisier/purin existent en nombre sur le marché. Les effets qui leur sont attribués sont rarement consolidés, étant plus souvent dus à une gestion soignée du lisier/purin. Un aperçu de ces additifs et de leur mode d'action peut être trouvé dans les publications, par exemple celle de l'ADCF (1999) ou celle de l'« IBK Arbeitsgruppe Landwirtschaft und Umweltschutz » (2009).

### 2.4.4 Aération du lisier/purin

La technique d'aération du lisier/purin n'est plus guère utilisée, n'apportant aucun avantage décisif ni sur l'aspect agronomique ni sur le plan écologique. Le procédé a néanmoins des avantages par rapport à la fermentation anaérobie en ce qui concerne les émissions d'odeurs. Mais le procédé est coûteux, tant à l'installation qu'à l'exploitation. Dans le cas d'une aération incorrecte (trop intensive ou trop fréquente), d'importantes pertes de N sous la forme d'émissions de  $\text{NH}_3$  sont inévitables.

## 2.5 Utilisation des engrais de ferme

### 2.5.1 Capacité de stockage des engrais de ferme et périodes d'épandage du lisier/purin et du fumier

Le lisier/purin et le fumier sont produits tout au long de l'année. Les moments où ils peuvent être épandus dépendent cependant du genre de culture, de ses besoins en éléments nutritifs, du stade de développement des plantes ainsi que du site et des conditions météorologiques, qui peuvent être des facteurs limitants (aptitude du sol au trafic des véhicules, risques de pertes d'éléments nutritifs). La condition préalable pour pouvoir épandre les engrais de ferme au moment optimal, sans être contraint de les évacuer en dehors de la période de végétation, consiste à disposer d'une capacité de stockage suffisante (figure 4). Cette capacité de stockage devrait être conforme aux prescriptions de l'OFEV et de l'OFAG (2011), soit une capacité de stockage couvrant au moins cinq mois en zone de plaine et de collines<sup>1</sup> et six mois dans les zones de montagne I à IV. La figure 3 montre pendant quelles périodes et pour quelles cultures un épandage des engrais de ferme est judicieux et possible.

### 2.5.2 Critères pour déterminer les quantités d'engrais de ferme à épandre

La quantité d'engrais de ferme dépend d'abord des besoins des cultures en N et en P ainsi que des teneurs en N et en P disponibles dans l'engrais de ferme concerné; pour les épandages fractionnés, les besoins en N sont déterminants, tan-

dis que pour un seul épandage dans la saison ou la quantité totale, le P est déterminant. Pour mesurer la teneur en  $\text{NH}_4^+$  du lisier/purin avec une précision suffisante, les tests rapides conviennent très bien (p. ex. Güllemax).

En général, les apports fractionnés de lisier/purin sont de 20 à 30  $\text{m}^3/\text{ha}$  en cultures fourragères et de 30 à 40  $\text{m}^3/\text{ha}$  en grandes cultures; pour le fumier au tas, on recommande de ne pas dépasser 20 t/ha de fumier décomposé (BDU 2004).

Avec des quantités plus importantes et/ou avec des teneurs en N ammoniacal plus élevées ou encore par des techniques d'épandage non optimales, le risque de pertes d'éléments nutritifs, d'ammoniac en particulier, croît fortement (tableau 2, module 5). Des recommandations pour éviter des pertes d'éléments nutritifs à l'épandage des engrais de ferme se trouvent dans le module 7.

Quant aux quantités maximales épandables, il faut se conformer aux limitations figurant dans les tableaux 3 et 4 du module 7. Les quantités de P, de K et de Mg épandues au cours de l'année doivent être récapitulées et prises en compte pour la prochaine fertilisation de fond. On admet que l'action du P, du K et du Mg a été complète au cours de l'année d'épandage. Avec le lisier/purin, la quantité épandue ne devrait pas dépasser, pour aucun élément nutritif, les besoins des plantes corrigés d'après les résultats des analyses de sol.



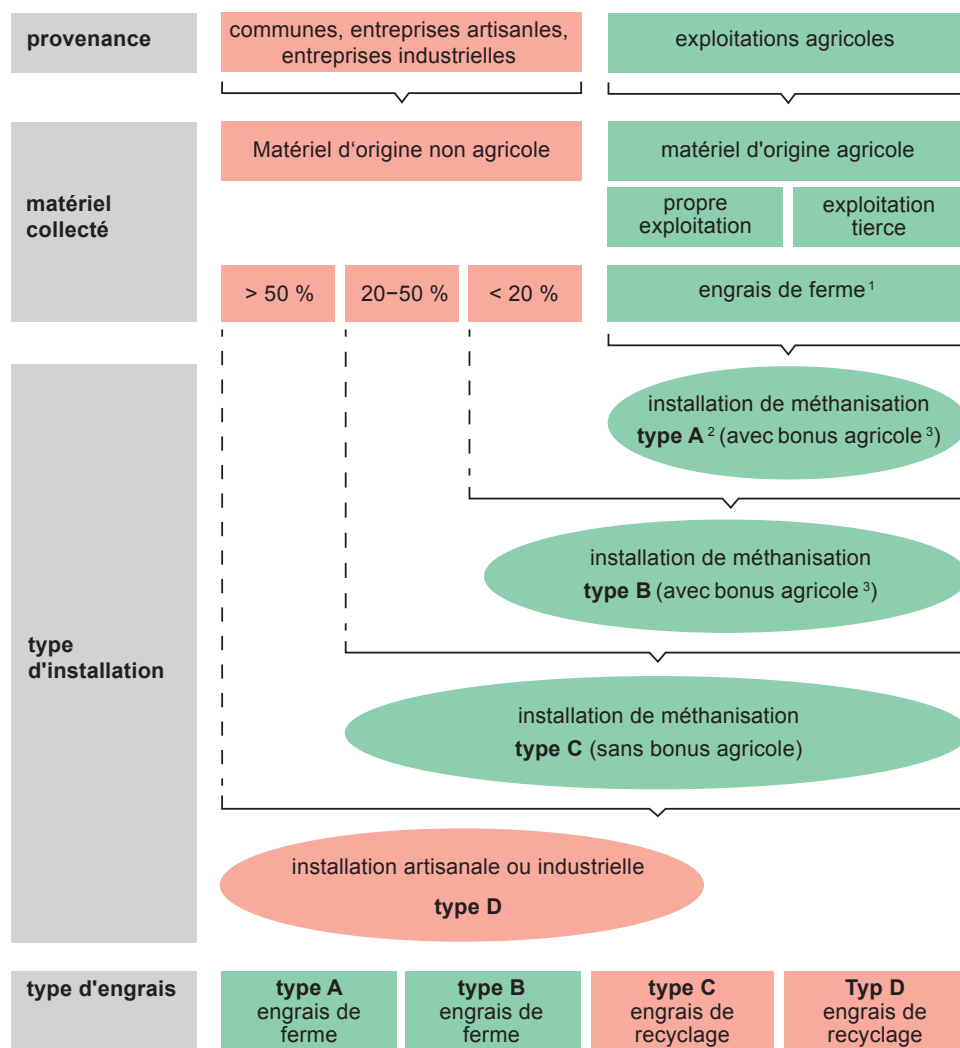
Figure 4. La condition préalable pour pouvoir épandre les engrais de ferme au moment optimal, sans être contraint de les évacuer en dehors de la période de végétation, consiste à disposer d'une capacité de stockage suffisante (photo: Gabriela Brändle, Agroscope).

## 3. Engrais de recyclage et produits de méthanisation

### 3.1 Introduction

Le compost, les digestats solides ou liquides ainsi que le matériel végétal non décomposé sont considérés comme des engrais de recyclage. La constitution d'un compost est correcte s'il est fait à partir de produits végétaux, animaux ou bactériens ayant subi une fermentation aérobie; les digestats solides ou liquides sont issus de la fermentation des mêmes matériaux que pour le compost, mais en condi-

<sup>1</sup> Selon ordonnance sur le cadastre de la production agricole et la délimitation de zones (ordonnance sur les zones agricoles, RS 912.1).



<sup>1</sup> Si l'engrais de ferme contient du matériel d'origine non agricole, comme l'autorise l'OEng (max. 20 %), celui-ci doit être comptabilisé.

<sup>2</sup> Les installations de méthanisation de type A fermentent uniquement des intrants d'origine agricole. Un engrais de ferme qui contient des intrants d'origine non agricole selon l'OEng (max. 20 %) ne peut donc pas être valorisé dans une installation de méthanisation de type A.

<sup>3</sup> En ce qui concerne le bonus pour la biomasse issue de l'agriculture, la proportion de cosubstrats non agricoles et de plantes énergétiques doit être inférieure ou égale à 20 % de la masse de matière fraîche (appendice 1.5, ch. 6.5 let. e OEng).

Figure 5. Classification des digestats en engrais de ferme ou en engrais de recyclage (selon Agridea et OFAG, 2013, modifié). Les produits de méthanisation des installations agricoles ayant transformé plus de 20% de matière fraîche d'origine non-agricole, sont considérés comme des engrais de recyclage.

tions anaérobies; ils proviennent généralement d'installations industrielles (figure 5).

Selon l'ordonnance sur les engrais (OEng, art. 5), les digestats sont considérés comme liquides si leur teneur en MS est inférieure à 20 %. Toutefois, des digestats liquides issus de la fermentation de produits solides peuvent être plus riches en MS (tableau 8). Les produits d'installations de méthanisation agricoles sont considérés comme engrais de recyclage si les engrais de ferme sont fermentés avec plus de 20 % de matériel d'origine non agricole (figure 5, OEng).

A côté des composts et des digestats, qui représentent la part la plus importante des engrais de recyclage, il existe des engrais organiques du commerce qui proviennent de sous-produits de la transformation de produits animaux ou végétaux. Comme exemple, on peut citer les copeaux de cornes ou des extraits de mélasse. Compte tenu de leur coût relativement élevé par unité nutritive, ils sont utilisés plutôt en cultures biologiques à haute valeur ajoutée (par exemple cultures spéciales, pommes de terre).

### 3.2 Teneur en éléments nutritifs dans les engrais de recyclage et les produits de méthanisation

Les teneurs en éléments nutritifs dans les digestats et les composts peuvent être très variables (tableau 8). Il est dès lors préférable de recourir à des résultats d'analyse plutôt qu'aux valeurs indicatives du tableau 8. Le calcul des apports d'engrais doit tenir compte des besoins des plantes en éléments nutritifs, des teneurs en éléments nutritifs des engrais, de l'efficacité des engrais à épandre, de l'arrière-effet d'apports d'engrais antérieurs et de l'état de fertilité du sol. Grâce au contrôle de routine des engrais de recyclage, on est assuré que seuls des engrais de recyclage pauvres en substances indésirables sont épandus.

### 3.3 Indications générales pour l'utilisation des composts et des produits de méthanisation issus d'installations artisanales et industrielles

Dans un laps de temps de trois ans, et dans les limites des besoins des plantes, on peut épandre comme engrais jusqu'à 25 t/ha de compost ou de digestats solides (la teneur en MS est déterminante) ou 200 m<sup>3</sup>/ha de digestats

**Tableau 8. Teneurs moyennes (valeurs médianes) en matière sèche (MS), en matière organique (MO) et en éléments nutritifs dans les engrais de recyclage issus d'installations artisanales ou industrielles.**

	Engrais de recyclage		
	Digestats solides <sup>1</sup> (IAI <sup>3</sup> )	Digestats liquides <sup>1</sup> (IAI <sup>3</sup> )	Compost <sup>2</sup>
	kg par t de matière fraîche		
<b>MS</b>	<b>490</b>	<b>130</b>	<b>510</b>
min <sup>4</sup>	290	50	220
max <sup>5</sup>	820	230	930
n <sup>6</sup>	197	106	1041
<b>MO</b>	<b>235</b>	<b>61</b>	<b>214</b>
min	44	47	46
max	368	77	480
n	197	106	1041
<b>N<sub>tot</sub></b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>7</b>
min	2	2	2
max	14	8	15
n	197	106	1039
<b>N<sub>sol</sub><sup>7</sup></b>	<b>0,3</b>	<b>2</b>	<b>0,3</b>
min	0,005	1	0,01
max	2,5	5	3
n	197	82	362
<b>N<sub>disp</sub> (%)</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>5–10</b>
<b>P (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)</b>	<b>1,3 (3)</b>	<b>0,9 (2)</b>	<b>1,3 (3)</b>
min	0,4 (1)	0,4 (1)	0,4 (1)
max	3,5 (8)	1,7 (4)	6,5 (15)
n	197	106	1038
<b>K (K<sub>2</sub>O)</b>	<b>4,2 (5)</b>	<b>3,3 (4)</b>	<b>4,2 (5)</b>
min	1,7 (2)	0,8 (1)	1,7 (2)
max	12,5 (15)	6,6 (8)	14 (17)
n	197	106	1038
<b>Mg</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>3</b>
min	1	0,5	0,5
max	7	2	10
n	197	106	1038
<b>Ca</b>	<b>25</b>	<b>5</b>	<b>25</b>
min	11	3	7
max	80	11	28
n	197	106	943
<b>Teneur en sel (mS/cm)<sup>9</sup></b>	<b>3</b>	<b>12</b>	<b>3</b>
min	0,6	7	0,6
max	8	30	8
n	197	82	481

<sup>1</sup> Actuellement, la base de données se rapportant aux produits de méthanisation des installations de biogaz agricoles est trop petite pour pouvoir fournir des valeurs fiables.

<sup>2</sup> Données se rapportant à des composts faits de déchets organiques provenant des ménages et des jardins. Les valeurs indiquées sont la médiane des valeurs provenant de divers types de composts: compost frais, compost mûr, compost de bord de champ. Leur poids volumique est de 500 à 800 kg/m<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Installations de méthanisation artisanales ou industrielles (IAI).

<sup>4</sup> Valeur minimale.

<sup>5</sup> Valeur maximale.

<sup>6</sup> Nombre d'échantillons analysés.

<sup>7</sup> N minéral, hydrosoluble, rapidement disponible pour les plantes (somme des teneurs en N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> et N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

<sup>8</sup> La base de données actuelle est encore trop petite pour en tirer des valeurs suffisamment sûres quant à la disponibilité moyenne du N des produits de méthanisation.

<sup>9</sup> Teneur en sels (mS/cm) < 1: basse, pas de dégâts aux plantes; 1–2: normale, pas de dégâts aux plantes; 2–4: moyennement élevée, dégâts possibles sur les plantes sensibles aux sels; > 4: élevée, dégâts sur de nombreuses plantes. Avec des teneurs en sel supérieures à 2 mS/cm, il est déconseillé d'épandre ces produits sur de jeunes plantes qui pourraient se révéler très sensibles aux sels (p. ex. maïs, pomme de terre, haricot, pois, trèfle violet, tabac).

liquides. Par période de 10 ans, au maximum 100 t de compost et de digestats solides (selon la teneur en MS) peuvent être apportées à titre d'amendement du sol, de substrat, de protection contre l'érosion, pour la remise en culture ou comme terre artificielle (ORRchim, annexe 2.6, 3.2.2).

Lors de l'épandage des digestats liquides, on doit appliquer les mêmes principes que pour les engrais de ferme (voir chapitre 2.5 et module 7). Les digestats solides peuvent être épandus tels quels, mélangés au compost ou compostés.

D'autres recommandations d'utilisation pour les digestats solides ou liquides ainsi que pour les composts sont contenues dans la Directive suisse 2010 de la branche sur la qualité du compost et du digestat (Abächerli et al. 2010).

## 4. Engrais minéraux

### 4.1 Introduction

Après les engrais de ferme, les engrais minéraux constituent la source la plus importante d'éléments nutritifs apportés aux plantes. Ils contiennent du N, du P, du K, du Mg, du soufre (S), du calcium (Ca) et différents microéléments, formulés en engrais simples ou composés.

Dans de nombreux cas, les engrais minéraux ne jouent qu'un rôle complémentaire par rapport aux engrais de ferme et de recyclage. Avec les engrais composés, on épand plusieurs éléments nutritifs en un seul passage, ce qui est plus économique. Si l'on veut tenir compte des disponibilités dans le sol, des besoins des cultures et du stade où les éléments nutritifs doivent être disponibles, il est souvent difficile de trouver l'engrais qui a la composition adéquate. Du point de vue tant agronomique qu'écologique, il est parfois plus judicieux d'apporter les éléments nutritifs manquants sous forme d'engrais simples.

Pour pratiquer une fertilisation conforme aux besoins des plantes et qui préserve l'environnement, il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance des engrais et de leurs propriétés. Ces informations de base se trouvent dans les chapitres suivants.

### 4.2 Principales propriétés des engrais minéraux

#### 4.2.1 Engrais azotés

Les formes de N contenues dans les engrais minéraux sont généralement plus vite disponibles pour les plantes que le N lié à la matière organique. Ces engrais peuvent être appliqués de manière plus ciblée (tableau 9). Pour une action rapide, on utilise un engrais contenant des nitrates, tandis que les engrais contenant du NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ont un effet légèrement retardé. Cette propriété du NH<sub>4</sub><sup>+</sup> est d'ailleurs à la base du système de fertilisation CULTAN (module 5). Le N uréique n'est disponible qu'après une métabolisation microbienne, ce qui en retarde l'effet. L'urée est toutefois l'engrais azoté le meilleur marché par unité de N. Il comporte cependant des risques de pertes non négligeables de N ammoniacal, particulièrement en sols alcalins et en conditions sèches

**Tableau 9. Propriétés des engrais azotés et des formes de N.**

Forme de N	Propriétés	Principes d'utilisation
Nitrate (salpêtre), $\text{NO}_3^-$	Action rapide; risque de lessivage élevé	Moment d'application et quantité selon les besoins des cultures à court terme
Ammonium, $\text{NH}_4^+$	Action retardée et durable; risque de volatilisation élevé	Incorporer au sol lors de longues périodes sans pluie
Nitrate d'ammonium (nitrate d'ammoniaque), $\text{NH}_4^+\text{NO}_3^-$	Action en partie rapide et en partie retardée	Incorporer au sol lors de longues périodes sans pluie
Urée, $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	Action retardée et durable; risque de volatilisation élevé	En sols neutres ou alcalins, incorporer légèrement; ne pas utiliser sur prairie en périodes de beau temps
N lié à la matière organique, $\text{R-NH}_2$	Action lente à très lente, incertaine; Minéralisation par les microorganismes du sol incontrôlable, avec des risques de pertes de nitrates par lessivage	Epandre des quantités modestes et régulières plutôt que des grosses quantités en une fois. Éviter les périodes de jachère pendant la période de végétation, car une minéralisation incontrôlable pourrait induire d'importantes pertes de nitrates par lessivage

**Tableau 10. Propriétés des différentes formes de phosphore et d'engrais phosphatés.**

Forme de P	Propriétés	Principes d'utilisation
Soluble à l'eau (p. ex. superphosphate, superphosphate triple)	Action rapide dans tous les sols, léger effet acidifiant	Utilisation régulière en sols neutres et alcalins; en sols acides, utilisation sporadique
Soluble au citrate d'ammonium (p. ex. phosphate de Rhénanie)	Action rapide pour une part, lente pour une autre	Utilisation en sols pauvres en P avec un pH < 6,6; en sols normalement pourvus avec un pH < 7,5
Soluble à l'acide citrique (p. ex. scories de Thomas, scories de Thomas calciques, poudre d'os)	Action lente; léger effet chaulant; contribue à la stabilité du pH dans les sols faiblement acides	Utilisation en sols pauvres en P avec un pH < 6,2; en sols bien pourvus avec un pH < 7,5
Phosphate naturel (p. ex. hyperphosphate)	Action très lente	Utilisation en sols acides (pH < 5,8) et en sols légèrement acides (pH 5,9 à 6,7)
Organique	Action lente à très lente; Ne devient disponible pour les plantes qu'après décomposition de la matière organique par les microorganismes du sol et par conversion enzymatique	Utilisation visant à maintenir la teneur en P dans les sols suffisamment pourvus; action retardée au printemps, particulièrement si le sol est froid

(l'engrais reste plus longtemps en surface), les émissions de  $\text{NH}_3$  augmentant parallèlement au pH du sol.

Dans le but de réduire les coûts par le nombre de passages pour des applications d'engrais fractionnées, tout en diminuant le risque de pertes de N après l'épandage, le commerce propose des engrais dits stabilisés parce qu'ils contiennent un inhibiteur de nitrification. On en attend des avantages particuliers, notamment une diminution du risque de lessivage ou de dénitrification du N contenu dans l'engrais, dans le cas d'un épandage anticipé en régions sèches ou d'un épandage tardif, pour lequel une incorporation au sol n'est plus possible. De tels engrais sont naturellement plus chers et il s'agit de mettre en balance les coûts d'épandage spécifiques à l'exploitation.

#### 4.2.2 Engrais phosphatés

Les engrais phosphatés sont caractérisés par la solubilité de leur P (tableau 10). Lors du traitement thermique et chimique du phosphate naturel, la structure de l'apatite est désagrégée et le phosphate devient de plus en plus soluble. Le P soluble à l'eau est totalement disponible pour les plantes.

Lorsque le traitement thermique est complet, le phosphate naturel est transformé pratiquement entièrement en phos-

phate soluble sous l'action de l'acide sulfurique ou de l'acide phosphorique. Pour abaisser les coûts de production, on procède à un traitement thermique partiel, avec moins d'acides. Il en sort des engrais avec diverses proportions de P solubles aux acides minéraux ou à l'eau. Les phosphates non traités des engrais qui se retrouvent dans le sol sont attaqués très lentement par l'action d'acides, contenus notamment dans les exsudats racinaires.

Les engrais minéraux phosphatés se différencient par leur vitesse d'action (tableau 10). Le superphosphate a l'action la plus rapide grâce à la solubilité de son P; le phosphate naturel est le plus lent, n'étant disponible pour les plantes qu'après solubilisation par les acides du sol (p. ex. les exsudats racinaires).

Pour choisir l'engrais phosphaté adéquat, il faut connaître le pH du sol: le superphosphate est utilisé pour les sols alcalins à neutres, les autres formes pour les sols légèrement acides à acides.

#### 4.2.3 Engrais potassiques

Toutes les formes d'engrais potassiques sont bien solubles à l'eau, donc rapidement disponibles (tableau 11). Le plus important, pour le choix de la forme de K, sont les substances annexes: les sels de potassium riches en chlore ne

**Tableau 11. Propriétés des différentes formes de potassium et d'engrais potassiques.**

Forme de K	Propriétés	Utilisation
Chlorure de potassium (p. ex. sels de potassium)	Soluble à l'eau; action rapide; risques de lessivage dans les sols sableux; contient 40–50 % de chlore	Limiter les apports à 300 kg K <sub>2</sub> O/ha, soit 249 kg K/ha; en sols très sableux, épandre au printemps; dosage réduit pour les cultures sensibles au chlore (p. ex. pommes de terre, tabac, différents légumes et petits fruits)
Sulfate de potassium (p. ex. sulfate de potassium, Patentkali/potasse magnésienne)	Soluble à l'eau; action rapide; contient 15–20 % de S	Utilisation sur cultures sensibles au chlore, sur les cultures aux besoins en S élevés et sur cultures avantagées en sols acides
Nitrate de potassium	Soluble à l'eau; action rapide; contient 13 % de N	Convient pour les applications foliaires; engrais spécial pour cas particuliers (légumes, tabac)

**Tableau 12. Propriétés de différentes formes de Mg, S et Ca et de différents engrais à base de ces éléments nutritifs.**

Élément nutritif	Forme	Propriétés	Utilisation
Magnésium (Mg)	Sulfate de magnésium (p. ex. kiesérite ou sel d'Epson)	Soluble à l'eau; action rapide; risque de lessivage en sols légers	Utilisation en cas de carence aiguë en magnésium (application foliaire ou épandage de kiesérite au sol); sel d'Epson en sols légers, à appliquer au printemps
	Carbonate de magnésium	Peu soluble; action lente, mais soutenue; faible risque de lessivage	Utilisation en cas de légers manques en sols acides; fertilisation d'entretien en sols peu acides à acides
	Oxyde de magnésium	Action décalée, mais soutenue	Utilisation pour une fertilisation d'entretien en tous types de sol
Soufre (S)	Sulfate (p.ex. kiesérite, sel d'Epson)	Soluble à l'eau; action rapide; risque d'être lessivé	Moment d'application et quantité en fonction des besoins des cultures à court terme (utilisation comme celle des engrais minéraux azotés)
	Soufre élémentaire	Action lente; sous cette forme, n'est pas disponible pour les plantes; doit être préalablement transformé en sulfate par les bactéries du sol	Épandre tôt (évent. en automne déjà); n'est pas adéquat en cas de carence aiguë en S
	Soufre lié à la matière organique	Action lente et imprévisible; minéralisation par les microorganismes du sol incontrôlable; fraction minéralisée exposée au lessivage	Éviter des apports massifs uniques; préférer de petits apports réguliers
Calcium (Ca)	Chlorure de calcium	Soluble à l'eau; action rapide	Utilisation en cas de carence en Ca aiguë (application foliaire)
	Sulfate de calcium (gypse)	Peu soluble à l'eau	Amendement du sol pour augmenter sa teneur en Ca sans élever le pH

devraient pas être épandus sur les cultures sensibles, éventuellement seulement à dose réduite. Le sulfate de potassium est approprié pour être épandu sur les cultures sensibles. Les engrais à base de sulfate de potassium conviennent aussi pour couvrir les besoins en S des cultures.

#### 4.2.4 Autres engrais minéraux (magnésium, soufre et calcium)

Il y a deux catégories d'engrais magnésiens: l'une agit rapidement grâce au sulfate de magnésium soluble à l'eau, indiqué en cas de carence en Mg; l'autre est à base de carbonate et d'oxyde de magnésium qui agissent plus lentement, ce qui les destine à une fertilisation Mg d'entretien (tableau 12).

Le S est utilisé généralement sous forme de sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) qui agit plus rapidement que le S lié à la matière organique, celui des engrais de ferme par exemple (tableau 12). Le S élémentaire ou sous forme de sulfate est contenu

dans divers engrais (tableau 13) qui sont utilisés avant tout comme engrais N, P, K ou Mg.

Il est rarement nécessaire d'appliquer une fertilisation à base de Ca uniquement, cet élément étant généralement présent dans le sol en quantités suffisantes. Les plantes absorbent le Ca seulement sous la forme de cation bivalent (Ca<sup>2+</sup>). Les teneurs du sol en Ca étant généralement élevées, cet élément est exposé au lessivage. S'il s'avère nécessaire de compléter l'apport de Ca, il faut effectuer ce complément par une application foliaire car, dans la plupart des cas, l'apport est destiné à des parties de la plante seulement, les feuilles ou les fruits par exemple.

#### 4.2.5 Autres engrais minéraux (microéléments)

Les microéléments sont souvent présents en quantités suffisantes dans le sol ou sont contenus dans d'autres engrais (minéraux ou organiques) épandus régulièrement. En cas de pH du sol très élevé ou d'apport important de chaux, il



Tableau 13. Teneurs en soufre et autres éléments nutritifs des principaux engrais minéraux.

Engrais	Teneur en soufre (%)	Teneur en éléments nutritifs (%)					
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Mg	Mn	Ca
Engrais azotés	Sulfate d'ammoniaque	24	21				
	Sulfonitrate	13	26				
	Sulfonitrate stabilisé (Entec®)	13	26				
	Sulfate d'ammoniaque en solution	9	8				
	Sulfate d'ammoniaque uréique en solution	6	20				
Engrais phosphatés	Superphosphate	12		18			10 <sup>1</sup>
	Superphosphate Mg	6		18	4,0		18 <sup>1</sup>
	NovaPhos 23	8		23			
Engrais potassiques	Sulfate de potassium	18		50			
	Patentkali	17		30	6,0		
	Sel de potasse 40 % avec MgO (potasse granulée)	4		40	3,6		
Engrais magnésiens	Sulfate de Mg (kiesérite; fertilisation de fond)	20			15,0		
	Sulfate de Mg (sel d'Epson; engrais foliaire)	13			9,8		
Autres engrais/ engrais composés	Sulfate de manganèse	15				32	
	Gypse (sulfate de calcium)	15					21 <sup>1</sup>
	Kaïnite magnésienne	4		11		3	
	Engrais composés	jusqu'à 8	selon indications du fabricant				
	Engrais foliaires	jusqu'à 18	selon indications du fabricant				

<sup>1</sup> Teneur en Ca sans action alcalinisante.

Tableau 14. Propriétés de différents amendements calciques.

Nom commercial	Formule chimique	Teneur en chaux		Teneurs en éléments annexes	Action
		Teneur (%)	Effet neutralisant <sup>1</sup> (référence pour l'effet chaulant, exprimé en équivalents CaO, %)		
Chaux Calcaire moulu Carbonate de calcium	CaCO <sub>3</sub>	> 90	50		lente
Chaux d'algues marines	CaCO <sub>3</sub> MgCO <sub>3</sub>	75–80 10	50	2–3 % Mg	lente
Dolomie	CaCO <sub>3</sub> MgCO <sub>3</sub>	50–60 40	45–50	12 % Mg	lente
Chaux éteinte	Ca(OH) <sub>2</sub>		55		rapide
Chaux vive	CaO	75–90	75–90		rapide
Chaux vive-chaux magnésienne	CaO MgO	60 25	95	15 % Mg	rapide
Chaux d'Aarberg (écumes de sucrerie) <sup>2</sup>	CaCO <sub>3</sub>	54	30	30 % H <sub>2</sub> O; 1,1 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ; 0,6 % Mg; 0,3 % N	moyenne
Engrais calcique, sous-produit de l'extraction de gravier	CaCO <sub>3</sub>	Variable selon provenance et charge		Teneur en éléments nutritifs faible	lente

<sup>1</sup> Valeur neutralisante déterminée par calcul = Teneur en % x (CaCO<sub>3</sub> x 0,56 + MgCO<sub>3</sub> x 0,67 + CaO x 1,0 + MgO x 1,39).

<sup>2</sup> Sous-produit de la transformation de la betterave sucrière, considéré comme engrais de recyclage.

peut arriver que la disponibilité de certains microéléments soit réduite. Dans de tels cas, on peut appliquer du bore (B), du manganèse (Mn) ou d'autres microéléments sous forme minérale dans le sol ou en application foliaire.

La fertilisation foliaire est généralement le moyen le plus sûr d'apporter les microéléments, car une partie des éléments pénètre directement dans les feuilles, sans risquer d'être bloqués dans le sol. La fertilisation foliaire permet de résoudre rapidement des problèmes de carence.

D'autres informations sur les microéléments en fertilisation et en application foliaire se trouvent dans les modules 2 et 3.

#### 4.2.6 Amendements calciques

Les amendements calciques ne sont pas destinés à apporter des éléments nutritifs, mais prioritairement à corriger le pH du sol et à améliorer la structure de celui-ci. La disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes en est indirectement influencée.

Les amendements calciques se différencient les uns des autres par la forme de la liaison chimique du Ca, celle-ci influençant directement leur rapidité d'action (tableau 14). La chaux éteinte et la chaux vive agissent rapidement, tandis que les produits à base de carbonate de magnésium ou de Ca agissent plus lentement. Les amendements calciques sont utilisés avant tout si l'on désire une augmentation rapide du pH du sol, auquel cas il s'agit de prendre en compte la tolérance des cultures à la chaux. Les chaux carbonatées agissant lentement conviennent particulièrement à du chaulage d'entretien. En plus de leur composition, la finesse de mouture des amendements calcaires influence leur efficacité. Une mouture fine augmente la surface des particules, ce qui améliore l'efficacité de l'amendement et sa vitesse d'action.

#### 4.2.7 Liste des engrais

Une liste des engrais disponibles dans le commerce, avec leur teneur en éléments nutritifs, se trouve dans les fiches techniques d'Agridea (2016). La liste actuelle peut être téléchargée à partir du lien <http://www.agridea.ch/fr/publications/publications/production-vegetale/fumure/liste-des-engrais-pour-les-grandes-cultures/>.

La liste des engrais admis en culture biologique se trouve dans la liste des Intrants pour l'agriculture biologique en Suisse de l'Institut de recherche en agriculture biologique (FiBL 2017).

Ces deux listes sont susceptibles d'être complétées par de nouveaux engrais autorisés à la commercialisation en Suisse.

### 4.3 Effet des engrais minéraux sur le sol

Les engrais peuvent influencer le pH du sol (tableau 15; Sluijsmans 1970). Il faut veiller à l'effet acidifiant en cas d'utilisation régulière d'engrais contenant du  $\text{SO}_4^{2-}$  ou du  $\text{NH}_4^+$ .

En plus de l'effet des engrais et de leurs composants sur le pH du sol, un grand nombre de processus biotiques et abiotiques peuvent aussi être modifiés. Pour des détails sur cette thématique, voir p. ex. Gisi *et al.* (1990).

**Tableau 15. Influence de divers engrais sur le pH du sol.**

Action acidifiante (pH en baisse)	Action neutre ou alcalinisante (pH stable ou en augmentation)
Engrais à base de sulfates	Cyanamide calcique
Engrais ammoniacaux	Scories Thomas, scories Thomas calciques
Urée	Hyperphosphate (phosphate naturel tendre)
Superphosphate, superphosphate triple	Lisier de porc
Lisier/purin de bovin	Engrais calciques (tableau 14)

L'utilisation répétée d'engrais non appropriés peut, à long terme, engendrer des effets indésirables, notamment l'accumulation de substances polluantes, des métaux lourds notamment (module 7).

## 5. Bibliographie

- Abächerli F., Baier U., Berner F., Bosshard C., Fuchs J., Galli U., Gfeller H., Leuenberger R., Mayer J., Pfaffen P., Schleiss K. & Wellinger A., 2010. Directive suisse 2010 de la branche sur la qualité du compost et du digestat. Avec recommandations d'utilisation pour digestat liquide, digestat solide et compost. Commission de l'inspection de la branche suisse du compostage et de la méthanisation. 40 p.
- ADCF, 1999. Additifs pour les purins et lisiers. Fiche technique ADCF D5. Association pour le développement de la culture fourragère ADCF, Nyon.
- Agridea, 2016. Fiches techniques grandes cultures. Agridea, Lindau.
- Agridea & OFAG, 2013. Instructions concernant la prise en compte des produits issus de la méthanisation dans le Suisse-Bilanz. Module complémentaire 8 du Suisse-Bilanz. Version 1.1, Septembre 2013. Agridea, Lindau, et Office fédéral de l'agriculture OFAG, Berne. 12 p.
- Agridea & OFAG, 2016. Weisungen zur Berücksichtigung von nährstoffreduziertem Futter in der Suisse-Bilanz. Auflage 1.8. Agridea, Lindau, und Bundesamt für Landwirtschaft, Bern. Accès: <https://www.blw.admin.ch/blw/fr/home/instrumente/direktzahlungen/oekologischer-leistungsnachweis/ausgeglicheneduengebilanz.html> [28. 2. 2017].
- Agroscope, 2015. Apports alimentaires recommandés pour les ruminants (Livre vert). Accès: <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/fr/home/services/soutien/aliments-pour-animaux/apports-alimentaires-recommandes-pour-les-ruminants%20.html> [02. 10. 2015].
- Agroscope, 2016. Apports alimentaires recommandés pour les porcs (livre jaune). Accès: <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/fr/home/services/soutien/aliments-pour-animaux/apports-alimentaires-recommandes-pour-les-porcs.html> [02. 10. 2016].
- Agroscope, 2017. Valeurs nutritives de référence des fourrages. Accès: [www.agroscope.admin.ch](http://www.agroscope.admin.ch)
- BDU, 2004. Hofdünger – gezielt eingesetzt. Beratergruppe «Boden Düngung Umwelt» BDU, AGRIDEA, Lindau. 4 p.
- Bosshard C., Flisch R., Mayer J., Basler S., Hersener J.-L., Meier U. & Richner W., 2010. Traitements pour améliorer l'efficacité de l'azote du lisier. Recherche Agronomique Suisse 1 (10), 378–383.

- FiBL, 2017. Liste des intrants 2017. Intrants pour l'agriculture biologique en Suisse. Institut de recherche de l'agriculture biologique FiBL, Frick. 132 p. Accès: <https://shop.fibl.org/chfr/1078-intrants.html> [22.12. 2016].
- Gisi U., Schenker R., Schulin R., Stadelmann F. X. & Sticher H., 1990. Bodenökologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York. 304 p.
- IBK Arbeitsgruppe Landwirtschaft und Umweltschutz, 2009. Güllebehandlung und Güllezusätze – Empfehlungen für die Landwirtschaft. Arbeitsgruppe Landwirtschaft und Umweltschutz der Kommission Umwelt, Internationale Bodenseekonferenz, Kempten. 29 p.
- Möller K. & Müller T., 2012. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engin. Life Sci.* 12, 242–257.
- OFEV & OFAG, 2011. Constructions rurales et protection de l'environnement. Un module de l'aide à l'exécution pour la protection de l'environnement dans l'agriculture. L'environnement pratique No. UV-1101-F. Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne. 122 p.
- Sinaj S. & Richner W., 2017. Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF). *Recherche Agronomique Suisse* 8 (6), publication spéciale, 276 p.
- Sluijsmans C.M.J., 1970. Der Einfluss von Düngemitteln auf den Kalkzustand des Bodens. *Z. Pflanzenern. Bodenk.* 126, 97–103.
- Webb J., Sørensen P., Velthof G., Amon B., Pinto M., Rodhe L., Salomon E., Hutchings N., Burczyk P. & Reid J., 2013. An assessment of the variation of manure nitrogen efficiency throughout Europe and an appraisal of means to increase manure-N efficiency. *Adv. Agron.* 119, 371–442.

## 6. Liste des tableaux

Tableau 1. Teneurs en éléments nutritifs des corps d'animaux, du lait et des œufs. ....	4/4
Tableau 2. Valeurs indicatives des quantités d'éléments nutritifs dans les fèces et l'urine de différents animaux de rente. ....	4/4
Tableau 3. Notes se rapportant au tableau 2 avec les données pour une attribution correcte des catégories ou pour des corrections spécifiques à des exploitations qui sont importantes pour le calcul des flux d'éléments nutritifs. ....	4/5
Tableau 4. Quantités indicatives d'engrais de ferme produits par différentes espèces d'animaux de rente dans différents systèmes de stabulation.....	4/6
Tableau 5. Valeurs indicatives pour déterminer les quantités d'eaux usées qui s'écoulent dans la fosse à purin. ....	4/8
Tableau 6. Teneurs indicatives en matière sèche (MS), en matière organique (MO) et en éléments nutritifs des engrais de ferme pour différentes espèces d'animaux de rente en stabulation.....	4/9
Tableau 7. Proportion de $N_{disp}$ à moyen terme et durant l'année de l'épandage dans différents engrais de ferme. ....	4/10
Tableau 8. Teneurs moyennes (valeurs médianes) en matière sèche (MS), en matière organique (MO) et en éléments nutritifs dans les engrais de recyclage issus d'installations de méthanisation industrielles. ....	4/14
Tableau 9. Propriétés des engrais et des formes d'azote. ....	4/15
Tableau 10. Propriétés des différentes formes de phosphore et d'engrais phosphatés. ....	4/15
Tableau 11. Propriétés des différentes formes de potassium et d'engrais potassiques. ....	4/16
Tableau 12. Propriétés de différentes formes de Mg, S et Ca et de différents engrais à base de ces éléments nutritifs. ....	4/16
Tableau 13. Teneurs en soufre et autres éléments nutritifs des principaux engrais minéraux. ....	4/17
Tableau 14. Propriétés de différents amendements calciques. ....	4/17
Tableau 15. Influence de divers engrais sur le pH du sol. ....	4/18

## 7. Liste des figures

Figure 1. Une valorisation des éléments nutritifs contenus dans les excréments des animaux qui soit à la fois conforme aux besoins de plantes et ménage l'environnement est un défi pour les exploitations avec bétail. ....	4/3
Figure 2. En cas d'absence temporaire de l'étable, les quantités d'engrais de ferme doivent être réduites en fonction des jours d'absence des vaches.....	4/7
Figure 3. Représentation schématique des possibilités d'épandage du lisier/purin en fonction du développement des cultures et des risques pour l'environnement. ....	4/11
Figure 4. La condition préalable pour pouvoir épandre les engrais de ferme au moment optimal, sans être contraint de les évacuer en dehors de la période de végétation, consiste à disposer d'une capacité de stockage suffisante. ....	4/12
Figure 5. Classification des produits de méthanisation en engrais de ferme ou en engrais de recyclage. ....	4/13

## 8. Liste des annexes

Annexe 1. Définitions de termes et d'abréviations dans le domaine des engrais.....	4/21
Annexe 2. Ajouts aux notes du tableau 2 en complément du tableau 3, avec des remarques générales et des données sur les conditions de production qui ont été à la base des calculs de déjections. ....	4/22
Annexe 3. Valeurs indicatives pour les éléments nutritifs contenus dans les déjections (fèces et urines) d'autres catégories d'animaux (si rien d'autre n'est mentionné, en kg par place et par an).....	4/23

## 9. Annexes

### Annexe 1. Définitions de termes et d'abréviations dans le domaine des engrais.

Extrait des annexes 2 et 3, module 17

Abréviation/ terme technique	Description usuelle/ explications
Azote disponible ( $N_{disp}$ )	Part du N total ou teneur en N des résidus de récolte, des engrais de ferme, des engrais de recyclages et des engrais verts, disponible pour la plante à court et moyen terme, lorsque le mode d'exploitation est optimal. Cette valeur n'est pas identique au N utilisable par les plantes, car une partie du N organique est aussi disponible en dehors de la phase de la formation du rendement. Le N disponible en dehors de la phase de formation du rendement peut engendrer une augmentation de la teneur en N des produits principaux ou secondaires désirée (ex: céréales) ou non désirée (ex: betterave sucrière, légumes à feuilles) ou une augmentation du lessivage des nitrates, plus particulièrement en grandes cultures et en culture maraîchère de plain champs.
Coefficient apparent d'utilisation de l'azote (CAU)	Fraction du N total d'un engrais (minéral ou organique) qui est absorbée par la culture jusqu'à la récolte. CAU se calcule à partir d'essais comparant les quantités d'azote absorbées par la culture dans un traitement fertilisé ( $N_{absFert}$ ) et dans un témoin non-fertilisé ( $N_{absTem}$ ): $CAU (\%) = (N_{absFert} - N_{absTem})/X \cdot 100$ où $X$ = dose de N apportée dans le traitement fertilisé.
Compost de fumier	Fumier stocké pendant plus de six mois et brassé plusieurs fois. La structure de la paille ou d'autres litières n'est plus visible. Teinte brun foncé. Matériel de base: fumier frais ou fumier de stabulation libre produit par des bovins, fumier d'autres espèces animales.
Crottes de poules	Contient la totalité des déjections des volailles collectées dans les poulaillers avec tapis à crottes
Efficacité du N	Effets du N des engrais de ferme et des engrais de recyclage sur le rendement et la qualité des plantes. La valeur est exprimée en pour-cent de l'effet obtenu par une même quantité de N contenu dans un engrais minéral de référence, en général le nitrate d'ammoniaque. Avec les cultures dont la période de croissance ne couvre pas la totalité de la saison (p. ex. céréales, pommes de terre) ainsi qu'en cas de mauvaise gestion des engrais de ferme, l'effet apparent du N des engrais de ferme est souvent plus faible. En revanche, les pertes sont plus élevées.
Fumier au tas	Fumier stocké pendant au moins trois mois sur une place en dur à l'extérieur de l'étable et sans traitement particulier. La structure de la litière est encore bien visible. Teinte brun foncé à verdâtre. Matériel de base: fumier frais de bovins.
Fumier composté	Fumier qui a été stocké pendant plus de trois mois et brassé au moins une fois. La structure de la litière est à peine visible. Couleur brune. Matériel de base: fumier frais ou fumier de stabulation libre provenant de l'élevage de bovins ainsi que fumier d'autres espèces d'animaux.
Fumier de poules, de poulets ou de dindes	Contient la totalité des déjections des volailles ainsi que la litière
Fumier de stabulation libre	Fumier de stabulation libre à litière profonde. Contient la totalité des fèces et des urines ainsi que de la litière
Fumier de veau, porc, cheval, mouton et chèvre	Fumier qui a été stocké plus de trois mois sur une place en dur en dehors de l'étable et sans manutention particulière. La structure de la paille ou d'autres litières est encore parfaitement visible. Contient en plus de la litière, la totalité des fèces et une part variable des urines produites.
Fumier frais	Fumier stocké pendant moins d'un mois
Lisier, lisier de porc	Contient la totalité des déjections animales plus éventuellement de la litière (paille hachée, sciure, copeaux, etc.).
MF	Matière fraîche
MO	Matière organique
MS	Matière sèche
$NH_3$	Ammoniac
$NH_4^+$	Ammonium
$NO_3^-$	Nitrate
$N_{sol}$	Formes de N solubles à l'eau (ammonium, urée, etc.) dans les déjections des animaux de rentes et dans les engrais de ferme
$N_{tot}$	Azote total (indépendamment de sa forme)
Purin	Contient une forte proportion d'urine et une proportion variable de fèces (selon système de stabulation et quantité de litière)
UGB	Unité gros bétail
Valeurs indicatives des teneurs en éléments nutritifs dans les engrais de ferme	La plupart des valeurs ont été établies à partir de plans d'affouragement (selon l'espèce animale, avec plusieurs rations). Il a aussi été tiré parti d'analyses d'engrais de ferme dans des exploitations de la pratique. Dans des cas particuliers, selon l'affouragement et le système de stabulation, d'importantes différences peuvent survenir.

**Annexe 2. Ajouts aux notes du tableau 2 en complément du tableau 3, avec des remarques générales et des données sur les conditions de production qui ont été à la base des calculs de déjections.**

Notes du tableau 2	Critères résumés	Description de la production
A1	Bovin d'élevage	Correspond à une vache laitière selon la note 1 du tableau 3. Les données sont valables pour une vache primipare de 27 à 30 mois. Pour un âge de mise bas de 24 mois, la consommation de fourrage de base est de 17 dt la première année avec une déjection de 30 kg N, 4,5 kg P, 36 kg K, 4 kg Mg, 12 kg Ca: en seconde année, ce sont 30 dt et une déjection de 45 kg N, 6,5 kg P, 54 kg K, 6 kg Mg, 18 kg Ca. Les veaux vendus entre 3 et 6 semaines ne sont pas pris en compte.
A2	Veau à l'engrais	Engraissement de 60 à environ 220 kg, avec un accroissement journalier de 1'400 g; environ 3,3 rotations par place de veau (selon la banque de données sur le trafic des animaux).
A3	Veau de vache allaitante	Veau élevé jusqu'à un poids final d'environ 350 kg (Natura-Beef) ou environ 220 kg (Natura-Veal); une seule rotation par année est possible.
A4	Engraissement de bovins (intensif)	Engraissement intensif d'environ 65 à 530 kg avec un accroissement journalier de 1'400 g (taurillons). Si les animaux sont placés en stabulation seulement après le sevrage, on peut calculer avec les valeurs se rapportant à des animaux âgés de plus de 160 jours durant toute la période d'engraissement. Pour les veaux en pré-engraissement, on peut utiliser les mêmes valeurs que pour les veaux d'engraissement.
A5	Bovins engraisés au pâturage	Engraissement au pâturage avec une ou deux périodes de pâture (environ 17 ou 22 mois), de la naissance à environ 530 kg.
A6	Jument avec poulain jusqu'à 6 mois	Le poulain né au printemps reste avec sa mère jusqu'à l'automne. S'il reste plus longtemps sur l'exploitation, il doit être pris en compte séparément. Le surplus de besoins en fourrages de la jument par rapport à un cheval de selle ou de trait est généralement couvert par des concentrés, sans augmentation de la ration en fourrage de base. Si le concentré se limite à de l'avoine (maximum 700 kg par année), la consommation de fourrage de base augmente de 5 dt.
A7	Autre cheval de plus de 3 ans	C'est un cheval adulte d'environ 550 kg. Pour des animaux plus légers comme des poneys, ânes ou de jeunes animaux, etc., les déjections peuvent être extrapolées en fonction du poids. Les données sont valables pour une faible charge de travail (une heure par jour de selle ou de trait). Pour une plus forte sollicitation, les quantités de N et de P dans les déjections augmentent de 7 % par heure d'activité physique, et de 4 % pour les autres éléments nutritifs.
A8	Place mouton	Brebis y compris les animaux d'élevage pour la remonte finition d'engraissement des autres jeunes animaux, part du bélier incluse. Les données se rapportent à une production relativement intensive avec du fourrage de prairie semblable à celui qui est destiné aux brebis laitières. Pour un élevage extensif, avec un fourrage à un stade d'utilisation avancé, la déjection est de 12 kg N, 2 kg P (4,6 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ), 17 kg K (20 kg K <sub>2</sub> O), 2 kg Mg et 7 kg Ca pour une consommation de fourrage de base de 8 dt par an.
A9	Place de porc à l'engrais	Une place de porc à l'engrais (PPE) correspond à une place d'engraissement de 26 à 108 kg avec un accroissement moyen de 800 à 850 g/jour et 7 jours de vide sanitaire entre les rotations (environ 3,3 rotations par année).
A10	Truie d'élevage	Une place de truie d'élevage (PTE) est occupée par une truie incluant 24 à 28 porcelets par année jusqu'à un poids de 25 à 30 kg. Les animaux destinés à la remonte sont considérés comme des porcs à l'engrais. Vide sanitaire: 0 jour par place de truie d'élevage et 3 jours pour les truies allaitantes, les truies portantes et les porcelets.
A11	Poule pondeuse	Durée de rotation d'environ un an. Sans influence sur les déjections.
A12	Poulette	Les poussins atteignent 1,3 à 1,6 kg en 18 semaines; 2 à 2,5 rotations par an.
A13	Poulet à l'engrais	Les quantités excrétées sont calculées pour 100 places normales (poids final d'au moins 2 kg) pour un taux d'occupation normal du poulailler (max. 30 kg/m <sup>2</sup> ) et alimentation sans sorties temporaires. Pour les races intensives, cela correspond à une durée d'engraissement d'à peine 40 jours. Contrairement aux autres animaux, les déjections des poulets d'engraissement sont calculées par place et non par animal engraisé, car le poids final des animaux ainsi que la durée des rotations sont très variables.

**Annexe 3. Valeurs indicatives pour les éléments nutritifs contenus dans les déjections (fèces et urines) d'autres catégories d'animaux (si rien d'autre n'est mentionné: en kg par place et par an).**

Type d'animal/type de production	Éléments nutritifs dans les déjections en kg par unité (animal ou place d'animal) et par an						Consommation de fourrage de base (dt MS/an)
	N	P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K	K <sub>2</sub> O	Mg	
Mulet, bardot de tout âge	25	5,7	13	35,7	43	9,0	17
Ane, poney, petits chevaux (de tout âge)	16	3,5	8,0	22,4	27	1,8	10
Agneau/cabri engraisés au pâturage	2,1	0,3	0,8	2,9	3,5	0,3	0,40
Bison, plus de 3 ans	60	13,1	30	91,3	110	6,0	39
Bison, moins de 3 ans	20	4,4	10	37,3	45	2,5	18
Daim <sup>1</sup>	20	3,1	7,0	24,1	29	2,4	10
Cerf	40	6,1	14	48,1	58	4,8	20
Wapiti	80	12,2	28	96,3	116	9,6	40
Lama, plus de 3 ans	17	2,8	6,5	23,2	28	1,7	8,5
Lama, moins de 3 ans	11	1,7	4,0	12,4	15	1,0	4,9
Alpaga, plus de 3 ans	11	1,7	4,0	14,9	18	1,0	5,5
Alpaga, moins de 3 ans	7,0	1,1	2,5	7,5	9,0	0,5	3,0
Lapin: lapereau inclus jusqu'à 35 jours	2,6	0,7	1,5	2,1	2,5	–	0,36
Lapin: lapereau à partir de 35 jours (100 places)	79	21,0	48	62,2	75	–	4,0
Autruche, plus de 13 mois	24	4,4	10	12,4	15	1,3	11
Autruche, moins de 13 mois	11	2,6	6,0	6,6	8,0	0,8	2,0
Canard (100 places)	66	14,8	34	19,9	24	5,0	–
Oie (100 places)	105	23,1	53	24,9	30	14	–
Pintade (100 places)	38	8,3	19	11,6	14	3,0	–
Caille (100 places)	30	7,9	18	5,4	6,5	–	–

<sup>1</sup> Mère plus petits jusqu'à 16 mois; une unité = deux animaux le jour du recensement.







## 5/ Techniques d'épandage des engrais de ferme, des engrais de recyclage et des engrais minéraux

Annett Latsch<sup>1</sup>, Walter Richner<sup>2</sup>, Thomas Anken<sup>1</sup> et Joachim Sauter<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Agroscope, 8356 Ettenhausen, Suisse

<sup>2</sup> Agroscope, 8046 Zurich, Suisse

<sup>3</sup> 3077 Enggistein, Suisse

Renseignements: [annett.latsch@agroscope.admin.ch](mailto:annett.latsch@agroscope.admin.ch)

## Table des matières

1. Introduction .....	5/3
2. Epandage de lisier et d'engrais de recyclage liquides .....	5/3
3. Epandage de fumier et d'engrais de recyclage solides .....	5/4
4. Epandage d'engrais minéraux .....	5/5
5. Bibliographie .....	5/6

## 1. Introduction

Il existe de nombreuses possibilités techniques pour l'épandage des engrais de ferme, des engrais de recyclage et des engrais minéraux. De gros progrès ont été faits en termes de précision de dosage et de répartition afin d'administrer aux plantes des quantités d'engrais conformes à leurs besoins. En plus du dosage et de la précision de répartition, la protection du sol est aussi au centre des préoccupations: les véhicules de transport proposés sont lourds et équipés de pneus larges. Le système de distribution joue un rôle important dans l'épandage du lisier, mais les conditions météorologiques et la dilution ont une influence considérable sur le niveau des pertes d'azote (N) par volatilisation d'ammoniac.

Les principaux systèmes d'épandage et de distribution pour les engrais de ferme, les engrais de recyclage et les engrais minéraux sont décrits ci-après.

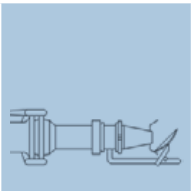
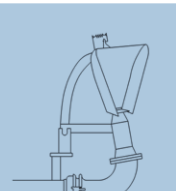
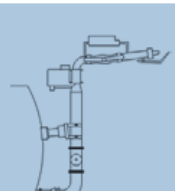
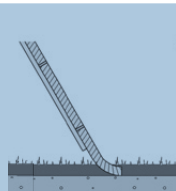
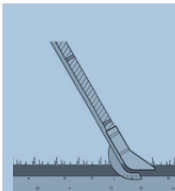
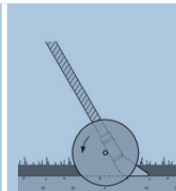
## 2. Epandage de lisier et d'engrais de recyclage liquides

L'épandage en nappe à l'aide de déflecteurs, d'épandeurs pendulaires ou de buses pivotantes (tableau 1) est la mé-

thode d'épandage du lisier la plus courante dans l'agriculture. Le lisier est projeté contre une tête de distribution et répandu sur de grandes surfaces de cultures. Grâce aux projets de protection des ressources naturelles et aux nouvelles contributions à l'efficacité des ressources prévues par la politique agricole 2014–2017, les rampes d'épandage à pendillards et les distributeurs à socs (tableau 1) sont également de plus en plus employés de nos jours. Par rapport à l'épandage avec un diffuseur en nappe, ce type de systèmes permet de réduire les pertes d'ammoniac de 40 % en moyenne, le lisier étant déposé au ras du sol et sous forme de bandes (figure 1). Les enfouisseurs à lisier permettent même une réduction des émissions de l'ordre de 70 % (Kupper et Menzi 2013), mais ils sont moins répandus du fait de leur coût élevé.

La précision de répartition des systèmes d'épandage réduisant les émissions est très bonne. Le N contenu dans le lisier étant mieux utilisé, il est possible de faire des économies sur les engrais minéraux azotés. Les odeurs gênantes dégagées pendant et après l'épandage diminuent elles aussi. Toutefois, comparés à l'épandage en nappe, ces systèmes sont nettement plus coûteux ce qui nécessite une rentabilisation optimale des machines, par exemple grâce à leur utilisation en commun par plusieurs exploitations.

Tableau 1. Récapitulatif des caractéristiques de différents épandeurs à lisier (modifié d'après Frick 1999).

	Déflecteur	Epandeur pendulaire	Buses pivotantes	Rampe d'épandage à pendillards	Rampe d'épandage à socs	Enfouisseur à lisier
						
Mode de construction	simple	simple/complexe	complexe	complexe	complexe	complexe
Largeurs de travail effectives	5–13 m; suivant le fabricant / le modèle	11–16 m; suivant le réglage	jusqu'à 20 m; suivant la pression et le réglage	6–36 m	3–18 m	6–9 m
Précision de distribution	satisfaisante dans l'ensemble à lacunaire	bonne à très bonne	très bonne	très bonne	très bonne	très bonne
Sensibilité au vent	élevée	moyenne	élevée	faible	faible	faible
Largeur de chevauchement nécessaire	0,5–2 m	1,5–2 m	3 m	0	0	0
Tolérance de chevauchement	faible	moyenne	très bonne	faible	faible	faible
Réglage de la largeur de travail	limité dans l'ensemble	limité	parfaitement possible	prédéfini	prédéfini	prédéfini
Epandage exact au début ou à la fin de la parcelle	impossible	impossible	impossible	possible aisément	possible aisément	possible aisément
Autres caractéristiques			possibilité d'épandage unilatéral; ne convient pas pour les citernes à lisier	réduction des émissions de 30 % par rapport à l'épandage en nappe	réduction des émissions de 50 % par rapport à l'épandage en nappe	réduction des émissions de 70 % par rapport à l'épandage en nappe

Les rampes d'épandage à pendillards et les distributeurs à socs utilisés avec une citerne à lisier peuvent être employés jusqu'à 15 % de déclivité. Avec le purinage à tuyaux, il est même possible d'aller jusqu'à une déclivité de 25 %. Par conséquent, ces deux techniques ont également un gros potentiel dans les régions vallonnées. Les enfouisseurs à lisier, quant à eux, conviennent plutôt pour les sols légers et peuvent être utilisés jusqu'à 10 % de déclivité (Sauter et al. 2004; Lorenz 2010; Sauter et al. 2010; OFEV et OFAG 2012).



Figure 1. Epandage du lisier en bandes sur une prairie à l'aide d'une rampe d'épandage à pendillards (photo: Agroscope).

Pour l'épandage des engrais de recyclage liquides, les techniques réduisant les émissions sont particulièrement avantageuses. Comme les engrais ont souvent une forte teneur en azote assimilable par les plantes, il est particulièrement important que le dosage soit exact. Pour le digestat liquide, qui doit généralement être réparti de manière extrêmement précise du fait de sa forte concentration en substances nutritives, la pratique emploie des compteurs-débitmètres à haute précision de dosage, de façon à ce que les recommandations de fertilisation spécifiques aux cultures puissent être respectées.

L'épandage de lisier et d'engrais de recyclage liquides devrait avoir lieu dans des conditions humides et fraîches, pour réduire autant que possible les pertes d'ammoniac. Une dilution à l'eau est également utile pour diminuer les pertes (Frick et Menzi 1997).

En cas d'utilisation de citernes à lisier, il faut tenir compte de la pression au sol. Les essieux simples et les pneus larges sont préférables surtout pour le sol et la couche herbeuse. Les essieux tandem se caractérisent par une conduite plus souple pendant les trajets sur route. Les systèmes d'épandage par tuyaux sont plus respectueux du sol mais moins flexibles que les citernes. Il n'est en effet guère possible de passer par-dessus le tuyau d'amenée du lisier avec les tuyaux semi-rigides à socs.

### 3. Epandage de fumier et d'engrais de recyclage solides

Dans le cas de l'épandage du fumier, il s'agit aussi d'épandre la quantité souhaitée à l'aide de différentes techniques (tableau 2), et ce le plus précisément possible sur l'ensemble de la parcelle. Sur les prairies et les pâturages, les apports finement répartis ne devraient pas dépasser 15 t par ha, pour éviter d'endommager la couche herbeuse en la recouvrant trop. Dans les grandes cultures, il est important que le fumier soit enfoui dans le sol quelques heures après son épandage pour réduire au maximum les pertes d'azote par volatilisation d'ammoniac.

La précision de l'épandage de fumier est influencée par différents facteurs. Outre la consistance du matériau de départ, le chargement minutieux de l'épandeur et la technique employée jouent un grand rôle (tableau 2). Pour le fumier de stabulation, les épandeurs utilisés en priorité sont les épandeurs avec rouleaux horizontaux (figure 2) ou verticaux. Pour l'épandage de fumier de volaille, ce type

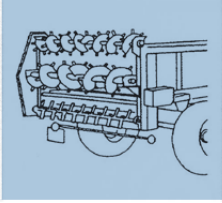
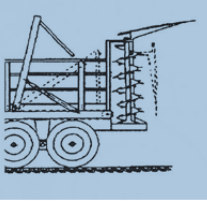
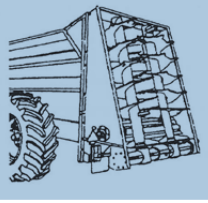
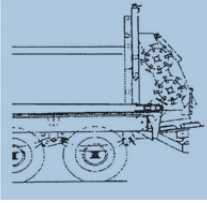
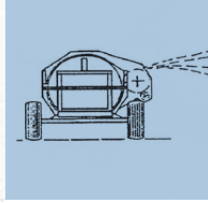


Figure 2. Epandeur à fumier avec deux rouleaux horizontaux (photo: Agroscope).

de machines ne convient guère car le fumier plus mou peut tomber directement en bloc sur le sol à l'extrémité du fond mouvant (Moser 2007). Dans ce cas, il est recommandé d'opter pour les épandeurs à disques sur lesquels un disque d'épandage placé en dessous des rouleaux assure une bonne répartition transversale.

Des dispositifs de pesée peuvent être installés pour surveiller la quantité épandue. Il est également possible de régler l'avancée du fond mouvant en fonction de la vitesse. Les dispositifs d'épandage en limite garantissent une répartition contrôlée dans les zones limitrophes. En région de montagne, les épandeurs latéraux se sont imposés. Ils permettent un épandage très fin et une bonne répartition en longueur grâce au panneau coulissant. Si besoin, les machines peuvent être équipées d'une tête de diffusion modulable afin de régler la portée de l'épandage (Hunger 2013a et 2013b).

**Tableau 2. Caractéristiques des différentes techniques d'épandage de fumier et d'engrais de recyclage solides (modifié d'après Hunger 2013a).**

	Epandeur à fumier	Epandeur universel	Epandeur mono-coque	Epandeur à disques	Epandeur latéral
					
Dispositif de distribution	2/3 rouleaux horizontaux	4 rouleaux verticaux	2 gros rouleaux verticaux	2/3 rouleaux horizontaux ou verticaux et 2 disques d'épandage	rotor de distribution, rotor-étoile
Dosage	fond mouvant (mécanique/hydraulique ou technique de poussée hydraulique)				fond mouvant, vis
Largeur de travail	3–4 m	6–7 m	6 m	11–15 m	10–15 m
Qualité de l'épandage transversal	satisfaisante	bonne à très bonne	bonne	bonne	satisfaisante
Qualité de l'épandage en longueur	insuffisante	satisfaisante avec porte guillotine	satisfaisante avec porte guillotine	satisfaisante avec porte guillotine	bonne
Convient pour	fumier de stabulation compost	fumier de stabulation compost fumier de volaille liquides épais	fumier de stabulation compost fumier de volaille liquides épais	fumier de stabulation compost fumier de volaille liquides épais chaux humide	fumier de stabulation compost fumier de volaille liquides épais chaux humide

**Tableau 3. Caractéristiques des différentes techniques d'épandage en nappe d'engrais minéraux solides (indications d'après Frick 2002 et Nagl 2011).**

	Epandeur centrifuge		Epandeur à rampe	
	Epandeur à disque	Epandeur à tube oscillant	Epandeur à vis	Epandeur pneumatique
Technique de distribution	dispositif de distribution en forme de disque	tube oscillant d'avant en arrière	vis sans fin	flux d'air
Largeur de travail	10–36 (–50) m	12–18 m	faible à moyenne	
Distribution transversale	bonne	très bonne	très bonne	
Adéquation pour différents engrais minéraux	exigences élevées par rapport à la granulométrie des engrais → moins adapté aux engrais légers ou en poudre et aux granulats moins consistants	exigences moins élevées en ce qui concerne la granulométrie des engrais par rapport aux épandeurs à disques	faibles exigences par rapport à la granulométrie des engrais → répartition régulière également dans le cas d'engrais légers ou en poudre	
Particularités	–	pour une distribution précise en limite ou sur les bordures, le tube oscillant doit éventuellement être changé	–	possibilité d'adapter le volume d'épandage à de petites surfaces (commande de tronçonnement; régulation de la quantité à l'intérieur du tronçon)

Pour l'épandage d'engrais de recyclage solides (compost, produits broyés), les machines les plus employées sont les épandeurs à compost et les épandeurs grandes cultures. Ils se caractérisent par une conception robuste (cuve, châssis, essieu), une capacité de chargement élevée et un dispositif d'épandage à disques. Une porte guillotine réglable de manière hydraulique, placée avant le dispositif d'épandage, améliore la précision de dosage.

#### 4. Épandage d'engrais minéraux

Les engrais minéraux solides sont épandus à l'aide d'épandeurs centrifuges ou d'épandeurs à rampe (tableau 3). En

Suisse, les épandeurs à deux disques avec des largeurs de travail allant jusqu'à 36 m sont largement répandus (Frick 2002). Par rapport aux épandeurs monodisque, leur répartition transversale est plus précise, car les asymétries de l'épandage sont atténuées par le sens de rotation opposé des deux disques d'éjection. La symétrie du profil d'épandage est encore meilleure avec les distributeurs à tube oscillant, qui ont toutefois une largeur de travail limitée (Nagl 2011). Dans le cas des distributeurs centrifuges, plusieurs passages se chevauchant permettent d'obtenir une répartition régulière sur l'ensemble de la surface. Pour obtenir une distribution précise en limite ou sur les bordures, il est nécessaire d'utiliser un dispositif spécial. Les épandeurs à rampe sont recommandés pour l'épandage d'en-

grais légers ou en poudre. En effet, ils sont relativement peu sensibles aux propriétés des engrais et permettent d'obtenir une bonne distribution transversale également avec de la chaux ou de l'urée (Nagl 2011). Ils nécessitent cependant des passages consécutifs précis et sont parfois nettement plus chers à l'achat que les épandeurs centrifuges.

Un épandage exact avec des distributeurs d'engrais minéraux suppose un réglage à l'aide du tableau d'épandage et de l'étalonnage du débit, car les particularités physiques des engrais peuvent varier du fait de l'humidité aux différentes dates d'épandage.

Pour compléter l'épandage en nappe, il est aussi possible de distribuer les engrais minéraux à l'aide d'épandeurs en ligne dans les cultures sarclées, en surface (Frick 1995; figure 3) ou de manière enfouie dans le sol à l'aide de socs fertilisateurs (Zihlmann *et al.* 2002), dans les rangées de plantes ou à proximité. Un tel apport d'azote généralement et/ou de phosphore à proximité des racines des plantes permet d'augmenter les rendements et d'optimiser l'utilisation des éléments nutritifs contenus dans les engrais; Frick l'a notamment montré (1995) pour la fumure azotée en ligne dans le maïs.



Figure 3. Epandage d'un engrais minéral en surface et à proximité des plantes à l'aide d'un dispositif de distribution en ligne (photo: Agroscope).

L'application d'**engrais minéraux sous forme liquide** à l'aide du pulvérisateur a fait ses preuves notamment pour les oligo-éléments. Des engrais à base de N uniquement, de N et de phosphore ou encore des liaisons contenant du magnésium et du soufre sont également employés. Les éléments nutritifs dissous sont directement appliqués sur les feuilles des plantes cultivées qui les absorbent par diffusion. Une feuille humide en surface favorise l'absorption. C'est pour cela qu'il est recommandé de procéder à l'épandage en soirée (Müller 2008).

Avec la fertilisation CULTAN, des solutions d'engrais riches en ammonium ont été injectées dans le sol à proximité des racines des plantes. Les dépôts d'ammonium sont censés apporter aux plantes une alimentation contrôlée sur la durée (Spiess *et al.* 2006; Flisch *et al.* 2013).

## 5. Bibliographie

- OFEV & OFAG, 2012. Eléments fertilisants et utilisation des engrais dans l'agriculture. Un module de l'aide à l'exécution pour la protection de l'environnement dans l'agriculture. Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne. L'environnement pratique 1225, 62 p.
- Flisch R., Zihlmann U., Briner P. & Richner W., 2013. Le procédé de fumure azotée CULTAN testé en conditions de culture suisses. *Recherche Agronomique Suisse* 4 (1), 40–47.
- Frick R., 1995. Fumure en ligne dans le maïs. Judicieuse du point de vue de la production végétale et réalisable du point de vue technique. *Rapports FAT* 466, Agroscope, Ettenhausen, 7 p.
- Frick R., 1999. Répartiteurs pour citernes à lisier. Différences importantes en ce qui concerne la largeur de travail et la précision d'épandage. *Rapports FAT* 531, Agroscope, Ettenhausen, 37 p.
- Frick R. & Menzi H., 1997. Epandage d'engrais de ferme: Comment réduire les pertes d'ammoniac? *Rapports FAT* 496, Agroscope, Ettenhausen, 12 p.
- Frick R., 2002. Distributeurs d'engrais centrifuges au banc d'essai. Distributeurs modernes à deux disques avec largeurs de travail élevées et grande précision d'épandage. *Rapports FAT* 580, Agroscope, Ettenhausen, 28 p.
- Hunger R., 2013a. Mistzetter: System- und Produktübersicht. *Schweizer Landtechnik* 2, 9–11.
- Hunger R., 2013b. Aus der Seite – in die Weite. *Schweizer Landtechnik* 12, 7–9.
- Kupper T. & Menzi H., 2013. Technische Parameter Modell Agrammon. Tierkategorien, Stickstoffausscheidungen der Tiere, Emissionsraten, Korrekturfaktoren. Version 30. 5. 2013. Accès: <http://www.agrammon.ch/assets/Downloads/Technische-Parameter-20130814.pdf> [13. 9. 2016].
- Lorenz F., 2010. Techniken der Gülleausbringung. Einfluss auf Ertrag, Futterqualität und Nährstoffeffizienz. *Milchpraxis* 4, 176–179.
- Moser A., 2007. Mist- und Kompoststreuer. *Schweizer Landtechnik* 3, 9–11.
- Müller E., 2008. Blattdüngung – Grundlagen, Möglichkeiten und Grenzen. 52. Kreuzbacher Wintertagung 29.1. 2008, Bad Kreuznach. Accès: [http://www.dlr-rnh.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/0/67ff3dfa65e88849c125742e0029f43c/\\$FILE/2008-04%20Blattd%C3%BCngung%20-%20bebilderte%20Version.pdf](http://www.dlr-rnh.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/0/67ff3dfa65e88849c125742e0029f43c/$FILE/2008-04%20Blattd%C3%BCngung%20-%20bebilderte%20Version.pdf) [13. 9. 2016].
- Nagl T., 2011. Schleuder- und Auslegerstreuer im Überblick – Die Stärken und Schwächen. *Die Landwirtschaft* 4, 3–4.
- Sauter J., Dux D. & Ammann H., 2004. Précision de répartition des rampes d'épandage à tuyaux souples. Bonne sur le plat, variable en pente. *Rapports FAT* 617, Agroscope, Ettenhausen, 12 p.
- Sauter J., Moriz C., Honegger S., Anken T. & Albisser Vögeli G., 2010. Comparaison entre rampes d'épandage à pendillards et distributeur de lisier traditionnel: Bénéficiaire des avantages de la rampe d'épandage à tuyaux souples engendre des coûts plus élevés. *Rapports ART* 739, Agroscope, Ettenhausen, 8 p.
- Spiess E., Irla E., Heusser J., Meier U., Ballmer T., Gut F., Richner W., Scherrer C., Wüthrich R. & Hebeisen T., 2006. Injection d'un dépôt d'engrais à base d'ammonium selon le système CULTAN. *Rapports ART* 657, Agroscope, Ettenhausen, 16 p.
- Zihlmann U., Weisskopf P., Bohren C. & Dubois D., 2002. Stickstoffdynamik im Boden beim Maisanbau. *Agrarforschung* 9 (9), 392–397.



## 6/ Fertilisation en agriculture biologique

Jochen Mayer  
Agroscope, 8046 Zurich, Suisse

Renseignements: [jochen.mayer@agroscope.admin.ch](mailto:jochen.mayer@agroscope.admin.ch)

## Table des matières

1. Introduction.....	6/3
2. Fertilisation azotée .....	6/3
2.1 Disponibilité de l'azote .....	6/3
2.2 Fixation symbiotique de l'azote .....	6/4
2.3 Résidus de récolte.....	6/4
3. Fertilisation phosphatée et potassique.....	6/4
4. Bibliographie .....	6/4



## 1. Introduction

Un des principes de l'agriculture biologique consiste à entretenir un cycle des éléments nutritifs aussi fermé que possible à l'intérieur d'une exploitation. La technique de production est fondée sur le principe du recyclage des éléments nutritifs afin de préserver les ressources naturelles. Les importations d'éléments nutritifs ainsi que la charge en animaux sont adaptées au potentiel de production local; les effectifs d'animaux sont généralement inférieurs à ceux des exploitations classiques. Par une gestion ciblée de l'exploitation, qui vise à une amélioration constante des propriétés chimiques, biologiques et physique des sols, on veut optimiser la production végétale. L'emploi répété d'engrais organiques dans l'agriculture biologique (engrais de ferme, compost, résidus de cultures) contribue à préserver la matière organique du sol et ainsi les ressources naturelles en éléments nutritifs (p. ex. le phosphore). Les effets indésirables sur l'environnement par des pertes d'éléments nutritifs dans l'atmosphère, dans les eaux ou dans les nappes phréatiques doivent être réduits autant que possible.

En agriculture biologique, on recherche des solutions durables pour l'ensemble de l'exploitation; dans cette perspective, l'organisation de la rotation des cultures et la gestion des engrais joue un rôle important. Des essais de longue durée comme l'essai DOK (figure 1) sont une source importante d'informations sur les effets à long terme de différents systèmes cultureux, tant du point de vue agronomique qu'écologique.

Ce module a pour but d'informer sur les principes de fertilisation des plantes en agriculture biologique. Toutefois, par manque de place, il n'est pas possible de développer les données spécifiques nécessaires à la gestion des cul-

tures. Des informations détaillées peuvent être trouvées dans l'ouvrage de Schmid et Obrist (2006) par exemple.

## 2. Fertilisation azotée

L'azote (N) est important en production végétale, car une déficience influence directement le niveau de rendement. Les engrais minéraux synthétiques n'étant pas admis en agriculture biologique, il faut tirer parti des engrais organiques, en particulier de ceux qui permettent de fixer le N<sub>2</sub> atmosphérique. Actuellement, les immissions de N de l'atmosphère représentent une quantité non négligeable.

En agriculture biologique, le pool de N minéral dans le sol est rarement très important. L'approvisionnement des plantes en N est assuré en grande partie par le pool de N organique du sol. Pour que le N du sol lié à la matière organique puisse être disponible pour les plantes, il faut que celui-ci soit préalablement minéralisé par les micro-organismes du sol et ainsi converti en ammonium et nitrate. L'efficacité de la minéralisation dépend de l'activité microbienne dans le sol, cette dernière étant aussi dépendante de la température ainsi que de l'eau et de l'oxygène disponibles. La quantité de matière organique influence aussi le fonctionnement de l'ensemble.

### 2.1 Disponibilité de l'azote

Selon la rotation des cultures, la disponibilité du N dans le sol peut subir des phases d'abondance ou de manque. Après une rompuée de prairie, par exemple, ou après une culture de légumineuses à graines, des quantités relativement importantes de N peuvent être minéralisées; le taux de minéralisation diminue en fonction du temps qui s'écoule après la rompuée. Pour obtenir la meilleure utilis-



Figure 1. L'essai de longue durée DOK est piloté par l'Institut de recherches en agriculture biologique FiBL et AgroScope. Il est l'essai de ce type le plus important au monde et permet de comparer, au champ, les systèmes cultureux classiques et biologiques (photo: FiBL).

tion possible du N, il est recommandé de placer les cultures, dont les besoins en N sont élevés (p. ex. les pommes de terre ou le blé), directement après une légumineuse, et celles qui ont des besoins modestes chronologiquement bien après les légumineuses, en règle générale à la fin d'une rotation. La conception de la rotation des cultures n'influence pas seulement la disponibilité du N, mais aussi la structure du sol (aération, capacité de rétention de l'eau). Ces facteurs conditionnent l'activité microbienne dans le sol, la minéralisation ainsi que l'immobilisation des éléments nutritifs.

La teneur en N des engrais de ferme et sa disponibilité peuvent varier fortement, selon l'espèce animale, la composition du fourrage, le système de stabulation et le stockage. Tous ces paramètres rendent la prévision du moment de libération du N hasardeuse. De ce fait, il est difficile de faire coïncider la quantité de N disponible avec les besoins des cultures. La synchronisation de la libération du N des engrais de ferme avec les besoins des cultures, dans la perspective d'atteindre le meilleur taux d'utilisation, reste un grand défi. L'épandage des engrais de ferme doit néanmoins être planifié. La quantité de N contenue dans les engrais de ferme d'une exploitation ne suffit généralement pas à couvrir les besoins des cultures. La présence de légumineuses dans la rotation ainsi que l'incorporation des résidus de récolte dans le sol contribuent à compléter les besoins en N. C'est une stratégie typique de l'agriculture biologique.

## 2.2 Fixation symbiotique de l'azote

La fixation du N atmosphérique par symbiose avec les bactéries des nodosités est un phénomène propre aux légumineuses. Après la rompu de la prairie, par exemple, le N fixé est minéralisé et ainsi rendu disponible pour les cultures suivantes.

La capacité de fixation des différentes légumineuses est cependant très variable, elle dépend notamment de la variété, de la part de trèfle d'une prairie, du climat ainsi que de la quantité de N déjà présente dans le sol. La capacité de fixation d'un mélange de trèfle et de graminées peut atteindre 250 kg N par ha et année. Pour les légumineuses à graines, en conditions de croissance optimales, cette quantité peut se situer entre 120 et 240 kg N par ha et année. Ce N est fixé dans la biomasse aérienne des plantes.

## 2.3 Résidus de récolte

Les résidus de récolte constituent aussi une source importante de N pour les cultures suivantes. Selon la quantité et leur qualité, 5 à 20 % du N qu'ils contiennent peut être disponible pour la culture qui suit. Après incorporation dans le sol, les résidus riches en N avec un faible rapport carbone (C):N sont rapidement minéralisés et le sol est ainsi enrichi en azote minéral. Dans les résidus de récolte pauvres en N et avec un rapport C:N élevé – la paille de blé par exemple – la minéralisation de N est plus lente. En conditions défavorables, ce N peut être immobilisé par les microorganismes du sol, ce qui le rend temporairement non disponible pour les cultures.

## 3. Fertilisation phosphatée et potassique

Une grande partie du phosphore (P) et du potassium (K) retourne dans le système par le biais des engrais organiques (engrais de ferme, compost, résidus de récolte). Ces éléments nutritifs peuvent aussi être intégrés aux réserves du sol. Dans les sols réputés moyennement ou faiblement pourvus (notamment dans les exploitations sans bétail), les besoins en P et en K peuvent être couverts par des engrais autorisés selon la liste des intrants pour l'agriculture biologique établie par le FiBL (FiBL 2017). Des analyses de sol régulières permettent de suivre le niveau de fertilité des sols et d'identifier à temps une éventuelle baisse (cf. module 2). Les éléments nutritifs contenus dans les engrais sont métabolisés par les micro-organismes, les racines des plantes ainsi que par des processus pédo-chimiques lents, de la même manière que les éléments nutritifs déjà présents dans le sol. C'est pourquoi dans les rotations de cultures biologiques, les engrais phosphatés et potassiques du commerce ne sont pas appliqués en fonction des cultures, mais de préférence dans les parcelles de légumineuses, car ces dernières ont d'une part des besoins élevés en P et, d'autre part, elles ont la faculté de bien s'approprier les formes peu solubles de P et de K.

## 4. Bibliographie

- FiBL, 2017. Liste des intrants 2017. Intrants pour l'agriculture biologique en Suisse. Institut de recherche de l'agriculture biologique FiBL, Frick. 132 p. Accès: <https://shop.fibl.org/chde/mwdownloads/download/link/id/76/> [17. 1. 2017].
- Schmid O. & Obrist R., 2006. Biologischer Landbau – Lehr- und Fachbuch für landwirtschaftliche Schulen und die Praxis. Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale LMZ, Zollikofen. 267 p.



## 7/ Fertilisation et environnement

Walter Richner<sup>1</sup>, Daniel Bretscher<sup>1</sup>, Harald Menzi<sup>2</sup> et Volker Prasuhn<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Agroscope, 8046 Zurich, Suisse

<sup>2</sup> Agroscope, 1725 Posieux, Suisse

Renseignements: [walter.richner@agroscope.admin.ch](mailto:walter.richner@agroscope.admin.ch)

## Table des matières

1. La fertilisation, un élément du cycle des éléments nutritifs .....	7/3
2. Adéquation des engrais et risques potentiels pour l'environnement .....	7/3
3. Mesures pour empêcher les pertes d'éléments nutritifs .....	7/4
3.1 Volatilisation de l'ammoniac .....	7/4
3.2 Dénitrification .....	7/6
3.3 Percolation: lixiviation et pertes par drainage .....	7/6
3.4 Ecoulement des eaux de surface: ruissellement et érosion .....	7/7
4. Conséquences d'une surfertilisation .....	7/8
5. Substances toxiques et germes pathogènes dans les engrais .....	7/8
6. Bases légales .....	7/10
7. Résumé des recommandations pour une fertilisation qui ménage l'environnement .....	7/10
8. Bibliographie .....	7/11
8.1 Références citées .....	7/11
8.2 Bibliographie spécialisée .....	7/11
9. Liste des tableaux .....	7/12
10. Liste des figures .....	7/12

## 1. La fertilisation, un élément du cycle des éléments nutritifs

La fertilisation consiste à restituer au sol les éléments nutritifs que les cultures ont prélevés. Selon le «concept de fertilisation en agriculture» appliqué en Suisse (figure 2, module 1), les engrais de ferme et les résidus de récolte restitués au sol représentent une part importante des éléments nutritifs exportés par la récolte. Les engrais importés dans l'exploitation (organiques et minéraux) interviennent subsidiairement pour combler un déficit éventuel entre les besoins en éléments nutritifs des cultures et les apports par les engrais de ferme.

Pour éviter des pertes d'éléments nutritifs risquant de polluer l'environnement tout en maintenant un niveau de fertilité durable du sol, il faut veiller autant que possible à l'équilibre entre les entrées et les sorties d'éléments nutritifs dans une exploitation (figure 1, module 1). Pour assurer un bilan des éléments nutritifs équilibré au niveau de l'exploitation, le Suisse-Bilanz (Agridea et OFAG 2016) est un outil de travail qui a fait ses preuves pour établir le bilan entre les éléments nutritifs disponibles sur l'exploitation et les besoins des cultures.

Dans les exploitations avec bétail plus particulièrement, il faut veiller à l'équilibre entre les éléments nutritifs contenus dans les engrais de ferme et les besoins des cultures, en tenant compte du niveau de fertilité du sol. L'intensité d'exploitation conforme au site doit être prise en compte. La production d'éléments nutritifs par le bétail n'est pas déterminée que par l'effectif des animaux de l'exploitation, mais aussi par l'affouragement. Il doit correspondre aux besoins actuels des animaux en termes d'énergie, de protéines et d'éléments minéraux. Ces paramètres amènent à réaliser un plan d'affouragement conforme aux besoins recommandés en fonction des performances des animaux. Ceci nécessite de connaître la composition de la ration de base et, si celle-ci ne couvre pas les besoins, de la compléter. Ce complément peut être constitué par exemple d'éléments de fourrages de base riches en énergie pour équilibrer une ration d'herbe riche en protéines. Les compléments peuvent aussi être constitués d'aliments concentrés bien dosés, d'additifs minéraux ou de fourrages spéciaux tels que des aliments pour porcs à teneurs réduites en phosphore (P) et en azote (N).

Pour parvenir à un bilan équilibré des éléments nutritifs au niveau de l'exploitation, il y a lieu de considérer le potentiel de production du site. En plaine, il est possible d'appliquer de plus grandes quantités d'éléments nutritifs qu'en montagne et donc le nombre d'animaux par unité de surface peut être plus élevé.

Par ailleurs, on aspire au maintien d'un niveau de fertilité du sol optimal: des excédents de certains éléments nutritifs peuvent éventuellement ne pas être valorisés en cas de carence d'autres éléments nutritifs et représentent donc un risque élevé de pollution.

Un bilan des éléments nutritifs équilibré est certes un objectif important, mais il ne garantit pas, à lui seul, que la

fertilisation ne pose aucun problème pour l'environnement. Il faut inclure une utilisation ciblée et conforme, du point de vue environnemental, de tous les engrais, des engrais de ferme en particulier. Des recommandations à ce sujet se trouvent dans le module 4.

## 2. Adéquation des engrais et risques potentiels pour l'environnement

Compte tenu de leurs propriétés, les engrais constituent un risque potentiel pour l'environnement très différent d'un engrais à l'autre (tableau 1). Le travail, les outils et le temps, autrement dit les divers moyens investis pour leur stockage et leur épandage diffèrent aussi dans une large mesure.

Les engrais de ferme et de recyclage présentent un risque environnemental élevé. Il y a plusieurs raisons à cet état de fait:

- Le N lié à la matière organique n'est disponible pour les plantes qu'après minéralisation. Le déroulement de celle-ci ne correspond pas forcément aux besoins des cultures, ce qui peut engendrer des pertes par différentes voies, principalement par la lixiviation des nitrates et la formation de protoxyde d'azote ( $N_2O$ ).
- La plus grande part de l'azote minéralisé se trouve sous la forme d'ammonium ( $NH_4^+$ ) qui peut s'échapper dans l'atmosphère sous forme d'ammoniac ( $NH_3$ ).
- Les teneurs en éléments nutritifs sont généralement moins connues avec exactitude et moins constantes que celles des engrais minéraux.
- La plus grande partie des engrais de ferme et des engrais de recyclage se trouve sous forme liquide. De ce fait, les risques de pertes sont plus élevés (ruissellement, infiltration).

Toute production animale à des fins alimentaires génère nécessairement des engrais de ferme qu'il est logique de valoriser sur les cultures de l'exploitation, en ménageant au mieux l'environnement. Il s'agit donc de prendre toute mesure nécessaire pour les gérer de manière écologique (optimisation des teneurs en éléments nutritifs dans les fourrages, stockage, moment et technique d'épandage). Une condition préalable importante pour limiter les risques de pertes consiste à disposer d'une capacité de stockage suffisante (chapitre 2.5.1, module 4) afin de ne pas devoir épandre fumier ou purin/lisier en dehors des périodes pendant lesquelles les cultures peuvent en profiter. La problématique de l'épandage des engrais durant la période de repos de la végétation n'est pas traitée ici, étant l'objet d'un document très complet d'aide à la concrétisation de la protection de l'environnement dans l'agriculture (OFEV et OFAG 2012).

Il est important de savoir qu'en règle générale les risques d'atteinte à l'environnement par les engrais de ferme augmentent plus que proportionnellement aux quantités disponibles par unité de surface. De ce fait, l'effectif d'animaux d'une exploitation doit être adapté à la quantité de fourrages produits d'après les potentialités du site. Les excédents

**Tableau 1. Risques potentiels d'atteintes à l'environnement lors de l'utilisation de différents types d'engrais et moyens investis pour remédier à la pollution du sol, de l'eau et de l'air.**

Les données de ce tableau reposent sur des bases scientifiques et le savoir des experts. On admet que l'application des engrais est faite de manière optimale, tant pour la quantité que pour la date d'épandage. La limite du système considéré comprend la fosse à purin/lisier, le tas de fumier et l'exploitation. Il n'est pas tenu compte ici du risque potentiel lié aux engrais de ferme dans l'étable, des engrais de recyclage ainsi que des engrais minéraux lors de leur conditionnement et de leur transport.

Type d'engrais	Potentiel de risques pour:				Critères techniques et économiques		
	Sol <sup>1</sup>	Nappe phréatique <sup>2</sup>	Eaux de surface <sup>3</sup>	Air <sup>4</sup>	Moyens investis pour le stockage et la manutention	Moyens investis pour un épandage précis	Moyens et restrictions pour un épandage sans risques pour l'environnement <sup>8</sup>
Purin/lisier	3	3	3	3	3	3	3
Fumier	2	3	2	2	2	2	3
Digestats liquides <sup>5</sup>	3	3	3	3	2	3	3
Digestats solides <sup>5</sup>	2	3	2	2	2	2	3
Compost	2	2	2	2	2	2	2
Engrais min. N <sup>6,7</sup>	1	2	1	2	1	2	2
Engrais min. P <sup>6,7</sup>	2	1	1	0	1	2	1
Engrais min. K <sup>6,7</sup>	1	2	1	0	1	2	1
Engrais min. Mg <sup>6,7</sup>	1	1	1	0	1	2	1
Engrais min. S <sup>6,7</sup>	1	2	1	0	1	2	1

Echelle d'appréciation du risque environnemental potentiel et des moyens techniques et économiques investis: 0 = donnée manquante, 1 = faible, 2 = moyen, 3 = élevé.

Type d'engrais: min. = minéral, N = azote, P = phosphore, K = potassium, Mg = magnésium, S = soufre.

<sup>1</sup> Emissions de substances dangereuses et atteintes physiques au sol.

<sup>2</sup> Emissions de nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), chlore (Cl), sulfate, germes de maladie et autres substances.

<sup>3</sup> Charge en P et en N, germes de maladie et autres substances.

<sup>4</sup> Emissions d'ammoniac et de protoxyde d'azote.

<sup>5</sup> Digestats provenant d'installations de méthanisation agricoles ou industrielles.

<sup>6</sup> La charge environnementale liée à la fabrication et au transport jusqu'à la ferme n'est pas prise en compte.

<sup>7</sup> Pour les engrais complexes, les critères d'appréciation sont fixés d'après la valeur la plus élevée de l'un des composants.

<sup>8</sup> Moyens investis (constructions, machines), temps de travail.

d'engrais de ferme doivent être transférés chez d'autres utilisateurs qui les valoriseront de manière conforme.

L'utilisation des engrais minéraux a aussi un effet sur l'environnement. Tout d'abord, leur production utilise souvent des matières premières non renouvelables; ensuite, une utilisation inadéquate (dosage, moment et technique d'épandage) peut avoir des répercussions environnementales (par exemple lixiviation du NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, eutrophisation des eaux). Toutefois, l'avantage des engrais minéraux par rapport aux engrais de ferme tient au fait qu'on peut les épandre de manière plus ciblée, leur teneur en éléments nutritifs et leur vitesse d'action étant connues.

### 3. Mesures pour empêcher les pertes d'éléments nutritifs

Les pertes d'éléments nutritifs constituent une perte économique pour l'exploitation et une charge environnementale à prendre au sérieux. Les pertes les plus courantes se

produisent par volatilisation du NH<sub>3</sub>, dénitrification, percolation (lixiviation et drainage) et écoulement des eaux de surface (ruissellement et érosion). Une fertilisation inadéquate augmente le risque de pertes.

#### 3.1 Volatilisation de l'ammoniac

Le NH<sub>4</sub><sup>+</sup> se transforme en NH<sub>3</sub> et se volatilise dans l'air sous forme gazeuse, puis une partie retombe plus tard sur le sol. Les écosystèmes sensibles peuvent être endommagés par les immissions de N atmosphérique (surfertilisation, acidification) et la percolation du NO<sub>3</sub><sup>-</sup> peut en être accrue. De plus, le NH<sub>3</sub> peut influencer des processus indésirables dans l'atmosphère en réagissant avec l'acide nitrique et l'acide sulfurique pour former des aérosols secondaires qui contribuent dans une large mesure à la pollution de l'air par les particules fines (Spirig et Neftel 2006).

Une réduction des pertes de NH<sub>3</sub> est directement profitable à l'exploitation, car cela signifie davantage de N disponible pour les plantes et des économies d'engrais. Une

réduction des pertes de  $\text{NH}_3$  dans les étables et durant le stockage des engrais de ferme est possible en nettoyant régulièrement les espaces salis et en couvrant les silos à purin/lisier.

D'importantes pertes de  $\text{NH}_3$  se produisent après l'épandage des engrais de ferme. Des mesures simples destinées à les diminuer sont résumées dans le tableau 2. Le choix du moment opportun pour l'épandage est déterminant (conditions météorologiques, état du sol, couverture du sol en grandes cultures). De plus, les pertes de  $\text{NH}_3$  avec les odeurs qui les accompagnent peuvent être sensiblement réduites en utilisant un système d'épandage adapté (rampe d'épandage à pendillards, rampe d'épandage à socs, enfouisseurs à purin/lisier) (module 5). Chaque fois que la topographie le permet, il faudrait faire usage de ces techniques (figure 1). En grandes cultures, le fumier devrait être incorporé peu d'heures après l'épandage.



Figure 1. Avec la rampe d'épandage à pendillards, les engrais liquides sont déposés au sol, en bandes étroites, avec peu de pertes, comparativement à l'épandage au moyen d'un déflecteur (photo: Harald Menzi, Agroscope).

**Tableau 2. Facteurs influençant la volatilisation de l'ammoniac et mesures visant à la réduction des émissions.**  
Les données de ce tableau sont fondées scientifiquement et reposent également sur le savoir des experts.

Critère	Conditions d'épandage	Risques	Mesures visant à éviter les pertes d'ammoniac	
			Purin/lisier et digestats liquides	Fumier et digestats solides
Météo	Température élevée, air sec, vent	Elevés	Epandage par journée fraîche et humide	Epandage par journée fraîche et humide
	Frais, humide, pas de vent	Moyens	Epandage en fin d'après-midi ou le soir	
	Précipitations pendant l'épandage	Faibles	Peu avant ou pendant une légère pluie (attention au risque de pertes par ruissellement)	Peu avant ou pendant une légère pluie (attention au risque de pertes par ruissellement)
Etat du sol	Surface du sol saturée d'eau, desséchée, compactée, croûtée,	Elevés	Epandre le purin/lisier uniquement sur un sol absorbant	
	Sol humide, capable d'absorber	Faibles à moyens		
Couverture du sol en grandes cultures	Sol couvert de paille hachée, couche de mulch, résidus de plantes (semis directs)	Elevés	Déchaumage avec injection simultanée (cultivateur avec dispositif d'incorporation à lisier) ou déchaumage avant l'épandage	
	Couvert végétal épais et dense	Moyens à élevés	Purin/lisier sur maïs: favoriser la pénétration du purin/lisier dans le sol (p. ex. sarclage préalable), application sous-foliaire	
	Sol sans couverture	Moyens	Diluer suffisamment le purin/lisier	
Taux de dilution du purin/lisier <sup>1</sup>	Non dilué	Elevés	Purin/lisier de bovin: dilution minimale 1:1, mieux 1:2; Purin/lisier, lisier de porc: dilution minimale 1:2, mieux 1:3	
	Moyennement dilué (jusqu'à 1:1)	Moyens		
	Très dilué (plus de 1:2)	Faibles		
Technique d'épandage (voir module 5)	Epandage en surface	Elevés	Epandage avec rampe d'épandage à pendillards / à socs, enfouisseur à purin/lisier, injection profonde, cultivateur avec dispositif d'incorporation à lisier	Incorporation immédiate (dans les quelques heures qui suivent l'épandage) par labour ou chisel
	Epandage par bandes et près du sol	Moyens		
	Incorporation directe dans le sol <sup>2,3</sup>	Faibles		

<sup>1</sup> Parts de purin/lisier:parts d'eau.

<sup>2</sup> Possible uniquement avec du purin/lisier ou des digestats liquides.

<sup>3</sup> Dilution pas nécessaire.

### 3.2 Dénitrification

La nitrification correspond à la transformation de  $\text{NH}_4^+$  en  $\text{NO}_3^-$ . L'étape suivante est le passage du  $\text{NO}_3^-$  en N gazeux ( $\text{N}_2$ ), appelée dénitrification (respiration nitrique), qui constitue une perte de disponibilités en N en termes de fertilisation. Du protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ , un gaz à effet de serre puissant) peut être libéré en tant que sous-produit ou produit intermédiaire aussi bien durant les processus de nitrification que de dénitrification. Ce protoxyde d'azote contribue dans une large mesure au réchauffement de l'atmosphère terrestre. Pour quantifier les émissions de protoxyde d'azote et d'autres gaz traces issus de systèmes agricoles, il faut disposer d'un équipement coûteux (figure 2).

Des températures élevées ainsi que, dans le sol, une bonne oxygénation et une teneur en eau modérée constituent les conditions idéales pour la nitrification. Cependant, la dénitrification est souvent le processus principal responsable des pertes de N par la formation de  $\text{N}_2\text{O}$ . Elle se produit en conditions d'anaérobiose, plus particulièrement en des endroits du sol à haute activité microbienne où il ne parvient pas suffisamment d'oxygène par diffusion gazeuse. Les conditions optimales pour les pertes d'azote par dénitrification prévalent donc principalement dans les agrégats du sol, en présence d'une quantité suffisante de nitrates et de



Figure 2. Mesure des émissions de protoxyde d'azote dans un essai de pâture au moyen de la méthode Eddy covariance (photo: Raphael Felber, Agroscope).

matières organiques, avec une température pas trop basse et une diffusion insuffisante de l'oxygène due à une teneur en eau élevée. De plus, des quantités importantes de  $\text{N}_2\text{O}$  peuvent se former lors des cycles de gel/dégel en automne et au printemps; les processus biochimiques correspondants sont cependant encore peu connus.

Les apports de N sous forme d'engrais de ferme, d'engrais minéraux, d'engrais de recyclage ou de résidus de récolte augmentent les disponibilités de  $\text{NH}_4^+$  et de  $\text{NO}_3^-$  dans le sol, favorisant ainsi tant la nitrification que la dénitrification. Ces phénomènes naturels sont difficilement influençables par des mesures culturales. En moyenne, un pourcent des apports de N se perd sous forme de  $\text{N}_2\text{O}$  (*Default Emission Factor* selon IPCC 2006). Mais une dénitrification complète jusqu'au niveau  $\text{N}_2$  peut engendrer en général des pertes bien plus importantes, jusqu'à 10%. Il a pu être établi par différentes études qu'en présence d'une grande quantité de N minéral, notamment en cas de fertilisation dépassant les besoins des plantes, l'accroissement des pertes est plus que proportionnelle aux quantités excédentaires (Snyder *et al.* 2009; Van Groenigen *et al.* 2010). Il est donc nécessaire d'éviter au maximum les risques de pertes locales et temporaires de  $\text{NH}_4^+$  et de  $\text{NO}_3^-$  dans le sol par une fertilisation n'excédant pas les besoins des plantes.

Les processus de nitrification et de dénitrification ne se produisent pas que dans les terres agricoles, mais aussi dans des écosystèmes semi-naturels par les immissions de  $\text{NH}_3$  et de  $\text{NO}_3^-$  provenant des terres cultivées et ils subissent les mêmes phénomènes qui ne sont pas négligeables. Les émissions correspondantes dépassent souvent la moyenne. Dans la perspective d'une agriculture respectueuse du climat, il est donc important de considérer l'ensemble des flux de N et de limiter au maximum les risques de pertes de N en se conformant aux recommandations contenues dans les tableaux 2 à 4.

### 3.3 Percolation: lixiviation et pertes par drainage

Des éléments nutritifs solubles ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , etc.) sont emportés dans le sol jusque dans la nappe phréatique (flux matriciel) par percolation. En conditions particulières, des engrais liquides peuvent aussi migrer en profondeur à travers les macropores (flux préférentiel) et quitter ainsi la zone des racines. Les deux types de migration des éléments nutritifs hors de portée des racines altèrent la qualité des eaux souterraines. La lixiviation des éléments nutritifs dans le sol, indépendamment de l'utilisation agricole, est étudiée en lysimètres (figure 3).

Une attention toute particulière doit être portée à la fertilisation en sols drainés, le cheminement de l'eau de percolation y étant sensiblement plus court. Les risques de pertes par flux matriciel et flux préférentiel y sont particulièrement élevés. Les pertes par drainage peuvent ainsi altérer la qualité des eaux de surface.

En cultures spéciales sur substrat, l'eau de drainage doit être récupérée par des rigoles et recyclée ou valorisée sur d'autres cultures.



Par des mesures adéquates, il est possible de réduire sensiblement les risques de pertes par lixiviation et drainage (tableau 3).

### 3.4 Ecoulement des eaux de surface: ruissellement et érosion

Les engrais sur le sol peuvent être entraînés par l'écoulement des eaux de pluie en surface ou emportés avec les matériaux arrachés par l'érosion. Les éléments nutritifs qui

quittent ainsi le champ polluent les eaux de surface (eutrophisation, mort de poissons, etc.). Les engrais liquides peuvent aussi s'écouler en surface, immédiatement après l'épandage si celui-ci n'a pas été effectué de manière adéquate ou si les conditions météorologiques qui suivent sont défavorables. Les surfaces inclinées qui ont une connexion directe avec les eaux de surface ou qui s'y raccordent indirectement par les grilles d'écoulement des eaux des routes et des chemins (figure 4) présentent un risque de pollution élevé (surfaces dites contributives selon

**Tableau 3. Facteurs influençant les pertes d'éléments nutritifs contenus dans les engrais par lixiviation et drainage. Recommandations pour un épandage des engrais liquides sans pertes.**

Les informations contenues dans ce tableau se fondent sur des données scientifiques et sur le savoir des experts.

Critères	Conditions	Risques de pertes par lixiviation et drainage	Charge possible en engrais liquides; mesures de prévention à l'épandage et dose maximale par épandage <sup>1</sup>
Conditions météorologiques	Pluies fortes ou de longue durée	Très élevés	Nulle; reporter l'épandage
Porosité du sol	a. Répartition et forme des pores:		
	Perméabilité aisée, gros pores, fracturé, aides artificielles à la percolation	Elevés	Faible à nulle; jusqu'à 25 m <sup>3</sup> /ha
	Perméabilité entravée, porosité fine, eau stagnante	Moyens	Réduite; jusqu'à 40 m <sup>3</sup> /ha
	Perméabilité normale, porosité moyenne	Faibles	Normale; jusqu'à 60 m <sup>3</sup> /ha *
	b. Remplissage des pores:		
	Capacité d'absorption nulle, saturé d'eau	Très élevés	Nulle; reporter l'épandage
	Sol absorbant, avec une capacité de 3 à 5 mm de liquide	Moyens	Réduite; jusqu'à 40 m <sup>3</sup> /ha
Sol très absorbant avec une capacité > 5 mm	Faibles	Normale; jusqu'à 60 m <sup>3</sup> /ha *	
Profondeur filtrante utile du sol	a. Profondeur utile insuffisante (< 30 cm)	Elevés	Faible; jusqu'à 25 m <sup>3</sup> /ha
	b. Profondeur utile suffisante (30–50 cm)	Moyens	Réduite; jusqu'à 40 m <sup>3</sup> /ha
	c. Profondeur utile bonne à très bonne (> 50 cm)	Faibles	Normale; jusqu'à 60 m <sup>3</sup> /ha *
Capacité de rétention utile et de filtration	a. Sols à faible capacité de rétention: Teneur en humus < 2 % Teneur en argile < 10 %	Elevés	Faible; jusqu'à 25 m <sup>3</sup> /ha
	b. Sols à capacité de rétention moyenne: Teneur en humus < 5 % Teneur en argile > 30 %	Moyens	Réduite; jusqu'à 40 m <sup>3</sup> /ha
	c. Sols à bonne capacité de rétention: Teneur en humus 2–10 % Teneur en argile 10–30 %	Faibles	Normale; jusqu'à 60 m <sup>3</sup> /ha *
Culture en place <sup>2</sup> (besoins en éléments nutritifs)	a. Besoins actuels ou dans un délai proche	Faibles	Normale; épandre la dose appropriée
	b. Pas de besoins momentanés:		
	Terres ouvertes	Très élevés	Nulle; pas d'épandage
Prairies	Elevés	Faible; jusqu'à 25 m <sup>3</sup> /ha	

<sup>1</sup> Les quantités maximales indiquées se rapportent à un purin/lisier normalement dilué. Pour des dilutions plus faibles, il faut réduire la dose d'après l'apport maximum de N admissible: pour les grandes cultures, voir le tableau 26 du module 8. Pour les prairies, voir le module 9.

<sup>2</sup> Pour savoir si les besoins des cultures en éléments nutritifs sont actuels, il faut tenir compte du repos végétatif. Des détails à ce sujet se trouvent dans OFEV et OFAG (2012).

\* Cette quantité est trop élevée pour un apport unique; elle devrait être fractionnée en deux épandages.



Figure 3. Procédés comprenant du colza, de la prairie temporaire et de la betterave sucrière étudiés dans une installation lysimétrique à Zurich-Reckenholz (photo: Volker Prasuhn, Agroscope).



Figure 4. Ecoulement des eaux de surface provenant d'un champ en amont immédiatement dans une grille collectant les eaux de la route: une voie directe pour la contamination des eaux de surface par des éléments nutritifs ou des matières auxiliaires de l'agriculture (photo: Volker Prasuhn, Agroscope).

Frey et al. 2011). Des bandes tampons enherbées et suffisamment larges le long des eaux de surface ou des voies de circulation drainées permettent de réduire les risques de pollution. Le tableau 4 indique comment organiser rationnellement l'épandage des engrais afin de prévenir ces risques.

#### 4. Conséquences d'une surfertilisation

Lorsque, durant une période prolongée, un élément nutritif est apporté au sol en quantités supérieures à celles qui sont exportées par les cultures, l'excédent enrichit le sol ou se perd dans les eaux ou dans l'atmosphère. Un fort enrichissement du sol peut entraîner les effets négatifs suivants:

- déséquilibre des éléments nutritifs dans le sol;
- teneurs en éléments nutritifs élevées et indésirables dans les plantes, dues à une consommation de luxe – p. ex.  $\text{NO}_3^-$  ou potassium – aboutissant à une altération de la qualité des aliments et des fourrages;
- modification de la composition botanique des herbages (prolifération d'espèces indésirables, raréfaction de certaines espèces);
- augmentation des risques de pertes d'éléments nutritifs.

Des pertes d'éléments nutritifs dans l'environnement peuvent notamment affecter les eaux, polluer l'air, conduire à l'eutrophisation d'écosystèmes naturels avec, comme corollaire, la disparition d'espèces.

Les effets négatifs d'une surfertilisation augmentent plus que proportionnellement à l'excédent d'éléments nutritifs par rapport aux besoins des cultures. Par conséquent, une fertilisation adaptée aux besoins et tenant compte des réserves du sol est primordiale pour éviter une altération des ressources naturelles. En adaptant la fertilisation de manière conséquente d'après les teneurs en éléments nutritifs, selon les données contenues dans le module 2, il est possible de ramener les disponibilités du sol au niveau de fertilité C (qualifié de satisfaisant). La durée de cette correction peut être plus ou moins longue (plusieurs années) selon l'élément nutritif en cause.

#### 5. Substances toxiques et germes pathogènes dans les engrais

Des substances toxiques peuvent parvenir au sol par la fertilisation et s'y accumuler. Les prescriptions pour l'autorisation des engrais consignées dans l'ordonnance sur la mise en circulation des engrais (OEng, Recueil systématique du droit fédéral RS 916.171) et dans l'ordonnance sur le livre des engrais (OLen, RS 916.171.1) ainsi que les valeurs limites fixées dans l'annexe 2.6 de l'ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim, RS 814.81) ont notamment pour but une limitation de la pollution des sols et des récoltes par des substances toxiques contenues dans les engrais.

Une attention particulière doit être portée aux métaux lourds que peuvent contenir non seulement les engrais de recyclage, mais également les engrais de ferme (p.ex. cuivre et zinc dans le lisier de porc) et les engrais minéraux (p. ex. le cadmium dans les engrais phosphoriques). Les utilisateurs d'engrais ne disposent en général d'aucune indication sur les teneurs en métaux lourds des lots qui leur sont fournis. La responsabilité légale pour la fourniture d'engrais pauvres en métaux lourds incombe aux fabri-

**Tableau 4. Facteurs influençant les pertes d'éléments nutritifs contenus dans les engrais par ruissellement ou érosion et recommandations pour un épandage des engrais liquides avec le moins de pertes possible.**

Les données de ce tableau reposent sur des données scientifiques et sur le savoir des experts.

Critères	Conditions d'épandage	Risques de ruissellement ou d'érosion	Dose admissible d'engrais liquides; mesures d'épandage adéquates et quantités maximales par épandage <sup>1</sup>
Conditions météorologiques	Pluies continues ou orages prévisibles sous peu	Très élevés	Dose admissible nulle; reporter l'épandage
Porosité du sol	<b>a. Sol nu<sup>2</sup></b>		
	Capacité d'infiltration réduite (tassement, croûtage, colmatage, saturé en eau, gelé, surface imperméable)	Très élevés	Dose admissible nulle; reporter l'épandage
	Sol bien filtrant, meuble, ressuyé, surface rugueuse	Moyens à faibles	Dose admissible réduite à normale; moins de 60 m <sup>3</sup> /ha*
	<b>b. Sol sous culture</b>		
	Capacité d'infiltration réduite (tassement, croûtage, colmatage, saturé en eau, gelé, surface imperméable)	Très élevés	Dose admissible nulle; reporter l'épandage
	Sol bien filtrant, meuble, ressuyé, surface rugueuse	Faibles	Dose admissible normale; jusqu'à 60 m <sup>3</sup> /ha *
	<b>c. Sol couvert de neige</b>		
	Neige très froide et sèche	Très élevés	Dose admissible nulle; reporter l'épandage
Neige fondante	Très élevés	Dose admissible nulle; reporter l'épandage	
Conditions topographiques	<b>Terres ouvertes</b> Risques d'érosion hydrique selon la carte des risques au quadrillage 2x2 m (CRE2) <sup>3</sup> et la carte de l'écoulement d'eau (CEE2) <sup>4</sup> :		
	Pas de risques d'érosion	Faibles	Dose admissible normale; jusqu'à 60 m <sup>3</sup> /ha *
	Risques d'érosion moyens	Moyens	Dose admissible réduite; jusqu'à 40 m <sup>3</sup> /ha
	Risques d'érosion élevés	Elevés	Dose admissible faible; jusqu'à 25 m <sup>3</sup> /ha <sup>△</sup>
	<b>Cultures herbagères</b>		
	Pente		
	≤ 18 %	Faibles	Dose admissible normale; jusqu'à 60 m <sup>3</sup> /ha *
	19–35 %	Moyens	Dose admissible réduite; jusqu'à 40 m <sup>3</sup> /ha
36–50 %	Elevés	Dose admissible faible; jusqu'à 20 m <sup>3</sup> /ha	
> 50 %	Très élevés	Dose admissible nulle; reporter l'épandage	

<sup>1</sup> Les quantités indiquées par épandage se rapportent à du purin/lisier suffisamment dilué. En cas de faible dilution, la réduction des quantités doit se calculer par rapport aux quantités d'éléments nutritifs à apporter.

<sup>2</sup> Le champ est juste ensemencé ou planté ou le sera peu après l'épandage.

<sup>3</sup> Les données de la carte des risques d'érosion figurent dans Gislser *et al.* (2011) ainsi que sur la plateforme de géoinformation de la Confédération sous: <https://map.geo.admin.ch/> > Géocatalogue > Nature et environnement > Sol > Risque d'érosion qualitatif 2.

<sup>4</sup> Les données de la carte hydrologique figurent dans Alder *et al.* (2015) ainsi que sur la plateforme de géoinformation de la Confédération sous: <https://map.geo.admin.ch/> Géocatalogue > Nature et environnement > Sol > hydrogéologie.

\* Cette quantité est généralement trop élevée pour être épandue en une seule fois. Préférer un apport en deux fois.

△ En plus des risques d'érosion selon CRE2, il y a lieu de tenir compte de la couverture du sol par la culture en place.

cants et aux importateurs ainsi qu'aux gérants d'installations de compostage ou de méthanisation. Les teneurs en métaux lourds des engrais sont contrôlées périodiquement par les cantons mandatés par l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG).

Les conséquences sur le sol des accumulations de médicaments vétérinaires (en particulier les antibiotiques), de polluants organiques, de substances analogues à des hormones ainsi que de l'uranium, un métal lourd radioactif,

sont encore peu connues. Ces substances sont amenées principalement par le biais des engrais de ferme et des engrais de recyclage, à l'exception de l'uranium qui parvient dans le sol par l'intermédiaire des engrais phosphoriques.

Des **germes pathogènes** peuvent aussi parvenir dans le sol par l'intermédiaire des engrais de ferme et des engrais de recyclage (Fuchs *et al.* 2014) et certains d'entre eux peuvent y survivre plusieurs mois. Le stockage du purin/lisier et la phase de thermisation du compost contribuent à réduire

les germes pathogènes à un niveau où ils sont généralement inoffensifs.

## 6. Bases légales

Des prescriptions légales destinées à la protection de l'environnement doivent être observées pour la mise dans le commerce des engrais et leur utilisation (OFEV et OFAG 2012), notamment les textes légaux suivants:

- ordonnance sur les produits chimiques (OChim, RS 813.11);
- ordonnance sur les atteintes portées au sol (OSol, RS 814.12);
- loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux, RS 814.20);
- ordonnance sur la protection des eaux (OEaux, RS 814.201);
- ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRchim, RS 814.81);
- loi sur la protection de l'environnement (LPE, RS 814.01)
- loi sur l'agriculture (LAgr, RS 910.1);
- ordonnance sur les engrais (OEng, RS 916.171);
- ordonnance sur le livre des engrais (OLen, RS 916.171.1).

La concrétisation de ces dispositions légales concernant l'utilisation des engrais trouve son application à travers différents modules d'aide à l'exécution pour la protection de l'environnement dans l'agriculture. En premier lieu, il y a les modules «Éléments fertilisants et utilisation des en-



Figure 5. Pour une fumure ciblée et respectueuse de l'environnement, les engrais doivent être apportés en quantités adaptées aux besoins, au moment où les plantes peuvent utiliser efficacement les éléments nutritifs qu'ils contiennent (photo: Gabriela Brändle, Agroscope).

grais dans l'agriculture» (OFEV et OFAG 2012) et «Constructions rurales et protection de l'environnement» (OFEV et OFAG 2011).

Les exploitations qui respectent les prescriptions écologiques requises (PER) sont soumises en plus aux directives de l'ordonnance sur les paiements directs (OPD, RS 910.13) avec les outils de mise en œuvre qui les accompagnent (p. ex. Suisse-Bilanz). Pour la participation volontaire à d'autres programmes, les prescriptions correspondantes se trouvent dans les ordonnances suivantes:

- ordonnance sur la culture biologique (RS 910.18);
- ordonnance du Département fédéral de l'économie, de la formation et de la recherche (DEFR) sur l'agriculture biologique (RS 910.181).

## 7. Résumé des recommandations pour une fertilisation qui ménage l'environnement

Une fertilisation dirigée et qui ménage l'environnement permet d'entretenir une fertilité durable du sol. Elle limite les pertes évitables de substances nutritives et contribue à réduire le coût des engrais. De cette manière, on participe au maintien d'une bonne qualité des eaux de surface, des eaux souterraines, de l'air et du climat. Il est cependant souvent difficile de remplir toutes les conditions en même temps. C'est le devoir de tous les agriculteurs de mettre à profit leurs compétences, avec l'appui des services de vulgarisation et l'utilisation des moyens d'aide à la décision, pour organiser la fertilisation au bon moment, d'après les besoins des plantes, les conditions du site et les conditions météorologiques (figure 5). Ce faisant, il faut veiller à ce que les mesures prises pour réduire les pertes d'éléments nutritifs dans un certain secteur ne les fassent pas passer dans un autre (*Pollution Swapping*; Stevens et Quinton 2009). Ainsi, par exemple, une diminution des émissions de  $\text{NH}_3$  peut entraîner une élévation des teneurs en  $\text{NO}_3^-$  dans le sol avec des pertes par lessivage et la formation de protoxyde d'azote (dénitrification). Il est donc de la plus haute importance de considérer l'ensemble du système pour mettre en place les mesures de réduction des risques de pollution.

Ci-après, les points essentiels à l'optimisation de la fertilisation selon Roberts (2007):

- engrais adéquat;
- quantité épandue adéquate;
- moment d'application adéquat;
- endroit d'application adéquat.

## Principales mesures pour réduire au mieux la pollution de l'environnement par les engrais:

- Adapter la charge en bétail d'après les besoins des cultures en éléments nutritifs.
- Planifier soigneusement la fertilisation parcelle par parcelles en tenant compte de la rotation des cultures et d'analyses de sol fiables.
- Valoriser de manière ciblée les éléments nutritifs des engrais de ferme de l'exploitation. Une analyse périodique de la teneur en éléments nutritifs des engrais de ferme peut être très utile.
- Appliquer des engrais de l'extérieur (engrais de ferme, engrais de recyclage, engrais minéraux) uniquement pour couvrir les différences entre les engrais de ferme de l'exploitation et les besoins des cultures.
- Adapter le moment d'épandage, la quantité nécessaire et la forme des différents apports d'engrais au stade de développement des cultures en tenant compte des disponibilités dans le sol, du site et des conditions météorologiques.
- Éviter tout épandage d'engrais azoté en dehors des périodes de croissance (volume de stockage pour le purin/lisier et le fumier en suffisance).
- Épandre les engrais liquides uniquement si le sol est suffisamment absorbant; renoncer à épandre des engrais liquides si le sol est saturé d'eau, tassé, croûté ou couvert de neige; une prudence particulière est de mise en sols drainés.
- Épandre les engrais de ferme et les engrais de recyclage liquides uniquement au moyen de systèmes d'épandage permettant de limiter les pertes de  $\text{NH}_3$  par volatilisation.
- Épandre le purin/lisier et le fumier uniquement par temps frais et calme (pendant l'épandage et si possible durant les 24 heures qui suivent: température < 15 °C, humidité relative de l'air > 70 %). En grandes cultures, griffer le sol avant l'épandage de l'engrais liquide ou l'incorporer par sarclage immédiatement après l'épandage ou si possible l'épandre par injection directe dans le sol.
- En grandes cultures, éviter les périodes sans couverture végétale (cultures dérobées, engrais verts, sous-semis, ensemencement de prairie temporaire, semis sous litière, etc.).

## 8. Bibliographie

### 8.1 Références citées

- Agridea & OFAG, 2016. Guide Suisse-Bilanz, édition 1.13. Office fédéral de l'agriculture OFAG, Berne. 25 p.
- Alder S., Prasuhn V., Liniger H.P., Herweg K., Hurni H., Candinas A. & Gujer H.U., 2015. A high-resolution map of direct and indirect connectivity of erosion risk areas to surface waters in Switzerland – A risk assessment tool for planning and policy-making. *Land Use Policy* 48, 236–249.
- Frey M., Konz N., Stamm C. & Prasuhn V., 2011. Identification des surfaces qui contribuent démesurément à la pollution des eaux. *Recherche Agronomique Suisse* 2 (4), 156–161.
- Fuchs J., Baier U., Berner A., Philipp W. & Schleiss K., 2014. Abschätzung des hygienischen Risikos im Zusammenhang mit der Anwendung von flüssigem Gärgut in der Schweiz – Schlussbericht. Publikation Nr. 290982. Bundesamt für Energie BFE, Bern.
- Gisler S., Liniger H.P. & Prasuhn V., 2011. Carte à haute résolution du risque d'érosion au raster 2x2 m (CRE2). *Recherche Agronomique Suisse* 2 (4), 148–155.
- IPCC, 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4 «Agriculture, Forestry and Other Land Use», Chapter 11 « $\text{N}_2\text{O}$  Emissions from Managed Soils, and  $\text{CO}_2$  Emissions from Lime and Urea Application». Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva. Accès: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html> [6.10.2016].
- OFEV & OFAG, 2011. Constructions rurales et protection de l'environnement. Un module de l'aide à l'exécution pour la protection de l'environnement dans l'agriculture. L'environnement pratique No. UV-1101-F. Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne. 122 p.
- OFEV & OFAG, 2012. Éléments fertilisants et utilisation des engrais dans l'agriculture. Un module de l'aide à l'exécution pour la protection de l'environnement dans l'agriculture. L'environnement pratique No. UV-1225-F. Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne. 63 p.

- Roberts T.L., 2007. Right product, right rate, right time, and right place ... the foundation of BMPs for fertilizer. *Better Crops* 91 (4), 14–15.
- Snyder C.S., Bruulsema T.W., Jensen T. L. & Fixen P.E., 2009. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 133 (3–4), 247–266.
- Spirig C. & Neftel A., 2006. Emissions agricoles d'ammoniac et particules fines. *Recherche Agronomique Suisse* 13 (9), 392–397.
- Stevens C.J. & Quinton J.N., 2009. Diffuse pollution swapping in arable agricultural systems. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 39 (6), 478–520.
- Van Groenigen J., Velthof G.L., Oenema O., Van Groenigen K.J. & Van Kessel C., 2010. Towards an agronomic assessment of  $\text{N}_2\text{O}$  emissions: a case study for arable crops. *European Journal of Soil Science* 61 (6), 903–913.

### 8.2 Bibliographie spécialisée

- BDU, 2004. Hofdünger – gezielt eingesetzt. Beratergruppe BDU, 2004. Hofdünger – gezielt eingesetzt. Beratergruppe «Boden Düngung Umwelt» BDU, Lindau. 4 p.
- BDU-Arbeitsgruppe «Ammoniak», 2005. Ammoniakverluste bei der Hofdüngerausbringung reduzieren. *UFA-Revue* 12, 33–34.
- BDU-Arbeitsgruppe «Ammoniak», 2011. Ammoniakverluste aus der Landwirtschaft – Wissenswertes in Kürze. 2. aktualisierte Auflage. Beratergruppe «Boden Düngung Umwelt» BDU, Lindau. 2 p.
- OFEV & OFEFP, 2004. Avis technique « La fumure au bon moment ». 2<sup>e</sup> édition inchangée.
- Station fédérale de recherches en agroécologie et agriculture de Zurich-Reckenholz FAL, Zurich. 4 p.
- UNECE, 2014. Leitfaden zur Vermeidung und Verringerung von Ammoniakemissionen aus landwirtschaftlichen Quellen. Deutschsprachige Version des Dokuments ECE/EB.AIR/120ECE/EB.AIR/120, erstellt im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU, Bern. 98 p.

## 9. Liste des tableaux

Tableau 1. Risques potentiels d'atteintes à l'environnement lors de l'utilisation de différents types d'engrais et moyens investis pour remédier à la pollution du sol, de l'eau et de l'air. ....	7/4
Tableau 2. Facteurs influençant la volatilisation de l'ammoniac et mesures visant à la réduction des émissions. ....	7/5
Tableau 3. Facteurs influençant les pertes d'éléments nutritifs contenus dans les engrais par lixiviation et drainage. Recommandations pour un épandage des engrais liquides sans pertes. ....	7/7
Tableau 4. Facteurs influençant les pertes d'éléments nutritifs contenus dans les engrais par ruissellement ou érosion et recommandations pour un épandage des engrais liquides avec le moins de pertes possible. ....	7/9

## 10. Liste des figures

Figure 1. Avec la rampe d'épandage à pendillards, les engrais liquides sont déposés au sol, en bandes étroites, avec peu de pertes, comparativement à l'épandage au moyen d'un déflecteur. ....	7/5
Figure 2. Mesure des émissions de protoxyde d'azote dans un essai de pâture au moyen de la méthode Eddy covariance. ....	7/6
Figure 3. Procédés comprenant du colza, de la prairie temporaire et de la betterave sucrière étudiés dans une installation lysimétrique à Zurich-Reckenholz. ....	7/8
Figure 4. Ecoulement des eaux de surface provenant d'un champ en amont immédiatement dans une grille collectant les eaux de la route: une voie directe pour la contamination des eaux de surface par des éléments nutritifs ou des matières auxiliaires de l'agriculture. ....	7/8
Figure 5. Pour une fumure ciblée et respectueuse de l'environnement, les engrais doivent être apportés en quantités adaptées aux besoins, au moment où les plantes peuvent utiliser efficacement les éléments nutritifs qu'ils contiennent. ....	7/10



## 8/ Fertilisation des grandes cultures

Sokrat Sinaj<sup>1</sup>, Raphaël Charles<sup>1</sup>, Alice Baux<sup>1</sup>, Brice Dupuis<sup>1</sup>,  
Jürg Hiltbrunner<sup>2</sup>, Lilia Levy<sup>1</sup>, Didier Pellet<sup>1</sup>, Guillaume Blanchet<sup>1</sup> et  
Bernard Jeangros<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Agroscope, 1260 Nyon, Suisse

<sup>2</sup> Agroscope, 8046 Zurich, Suisse

Renseignements: sokrat.sinaj@agroscope.admin.ch

## Table des matières

1. Introduction .....	8/3
2. Caractéristiques générales et besoins en éléments nutritifs .....	8/3
2.1 Céréales à paille .....	8/3
2.2 Pomme de terre .....	8/5
2.3 Cultures oléagineuses (colza et tournesol) .....	8/7
2.4 Protéagineux .....	8/9
2.5 Maïs .....	8/10
2.6 Betterave sucrière .....	8/12
2.7 Systèmes de culture et cultures intermédiaires .....	8/13
3. Normes de fertilisation .....	8/15
3.1 Fertilisation azotée .....	8/15
3.2 Fertilisation phosphatée, potassique et magnésienne .....	8/28
3.3 Soufre .....	8/29
3.4 Bore, manganèse et autres oligo-éléments .....	8/30
4. Résidus de récolte .....	8/31
5. Pratique de la fertilisation .....	8/32
5.1 Plan de fumure .....	8/32
5.2 Choix des engrais .....	8/32
5.3 Moment d'application et fractionnement des apports .....	8/34
5.4 Techniques d'épandage .....	8/36
5.5 Possibilités d'optimisation ou de réduction de la fertilisation N .....	8/37
5.6 Possibilités de simplification de la fertilisation P, K et Mg .....	8/37
6. Bibliographie .....	8/38
7. Liste des tableaux .....	8/41
8. Liste des figures .....	8/42
9. Annexe .....	8/43

Couverture: effet de la fertilisation azotée sur la croissance de blé dans un essai de longue durée à Changins  
(photo: Carole Parodi, Agroscope).



## 1. Introduction

La fertilisation raisonnée des grandes cultures doit prendre en considération plusieurs facteurs: les besoins en éléments nutritifs des plantes, la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol, les restitutions d'éléments nutritifs par les résidus de récolte, la quantité et la forme chimique des éléments nutritifs apportés par les engrais minéraux et les engrais de ferme, le devenir des éléments nutritifs dans le système sol – plante – environnement (air, eau) ainsi que la rentabilité économique de la culture.

Les différentes méthodes/approches de fertilisation des grandes cultures visent à fournir la quantité appropriée d'éléments fertilisants pour que ceux-ci ne soient pas des facteurs limitant le développement de la culture. La fertilisation n'est qu'un des nombreux facteurs contribuant au succès de la récolte: le choix variétal, les conditions climatiques (précipitations, température) ainsi que la pression des maladies et des ravageurs, etc. jouent aussi un rôle.

Ce module met à disposition du monde agricole des connaissances concernant: (i) les particularités des grandes cultures vis-à-vis de la fertilisation (physiologie de prélèvement, exigences liées à la fertilité des sols et à l'environnement, exigences liées à la qualité des récoltes, etc.), (ii) les besoins en éléments nutritifs des différentes cultures, (iii) des méthodes de raisonnement de la fertilisation et de détermination des normes de fertilisation pour chaque culture ou groupe de cultures et (iv) les pratiques de fertilisation.

Par rapport à la version précédente des Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages (Sinaj *et al.* 2009), ces informations ont été actualisées grâce aux travaux effectués par Agroscope au cours des sept dernières années.



Parcelle de phacélie (photo: Agroscope).

## 2. Caractéristiques générales et besoins en éléments nutritifs



Parcelle de blé (photo: Agroscope).

### 2.1 Céréales à paille

#### 2.1.1 Caractéristiques générales

128'135 hectares de céréales à paille étaient cultivés en Suisse en 2015, dont 75'248 ha de blé panifiable, 8'182 ha de blé fourrager, 28'182 ha d'orge, 8'447 ha de triticale, 1'974 ha de seigle, 1'633 ha d'avoine, 4'146 ha d'épeautre et d'autres céréales panifiables (Swiss granum 2015).

Les céréales d'automne sont semées entre fin septembre (à l'exemple de l'orge) et fin octobre (blé ou triticale). Les céréales à paille peuvent être semées plus tard, mais leur tallage et par conséquent leur potentiel de rendement en grain diminuent. Les moissons sont réalisées entre fin juin et mi-août, selon l'espèce et le milieu.

Le blé et l'épeautre se développent bien sur les sols mi-lourds à lourds à pH neutre, alors que le triticale peut aussi être cultivé dans des zones marginales (Vullioud 2005). Tandis que le seigle supporte des sols pauvres, de texture légère et de pH acide, l'orge craint l'acidité et préfère les sols aérés. L'avoine a un système racinaire important et supporte même les sols acides avec une mauvaise structure, pour autant qu'il y ait assez d'eau disponible.

Des difficultés lors des travaux du sol et du semis peuvent entraîner un enracinement médiocre qui va limiter la croissance, en raison d'une faible absorption d'eau ou d'éléments nutritifs. La compaction du sol ou la mauvaise maîtrise des maladies racinaires, comme le piétin-échaudage, peuvent aussi être à l'origine d'un mauvais enracinement. Même dans ces cas, l'effet sur le rendement dépend également d'autres facteurs tels que les précipitations (Lucas *et al.* 2000).

### 2.1.2 Besoins en éléments nutritifs

Les céréales à paille ont des besoins assez élevés en azote (N), mais sont peu exigeantes en phosphore (P) et potassium (K). Leurs besoins en soufre (S) ne sont pas très élevés; mais, dans les situations à risque (sols à texture légère avec une faible capacité de rétention de l'eau ou avec une pluviométrie hivernale importante), un apport est recommandé sous la forme de sulfate (UNIFA 2015). Celui-ci peut être couplé à l'apport azoté.

L'absorption des éléments nutritifs (N, P, K, S) durant la croissance du blé est illustrée dans la figure 1. La dynamique d'absorption varie selon les éléments: celle du K, élément fortement présent dans les

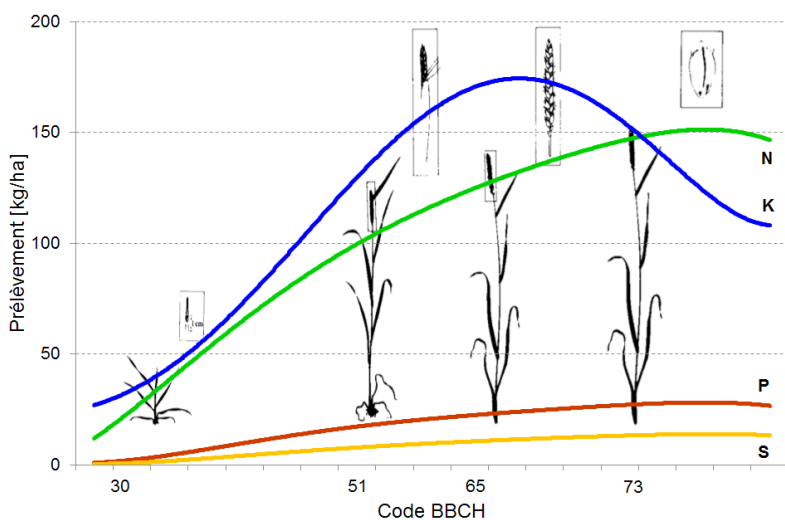


Figure 1. Courbe d'absorption des éléments nutritifs (N, P, K, et S) par la culture de blé (plante entière) sur la base d'un rendement de 60 dt/ha (adapté selon SCPA 1995) et en fonction du développement physiologique de la plante (échelle BBCH de Hack 1993).

feuilles, débute tôt puis ralentit pendant le remplissage et la maturation du grain. Le N, le P et le S par contre sont prélevés régulièrement tout au long de la croissance. Le P et le N seront transférés vers les grains pendant le remplissage de ceux-ci, tandis que le K reste dans le feuillage (Schvartz *et al.* 2005). Pour les orges, les teneurs en éléments nutritifs dans les grains et la paille varient beaucoup selon les conditions du milieu et le type de variété (deux ou six rangs) (Charles *et al.* 2012). La concentration en K dans la paille est trois fois plus élevée que dans les grains.

### 2.1.3 Fertilisation azotée et rendement en grain

Le rendement en grain des céréales est influencé par divers facteurs. La fertilisation N joue un rôle important (Levy et Brabant 2016; Charles *et al.* 2012; Levy et Schwaerzel 2009; Levy *et al.* 2007; Levy *et al.* 2009). Dans de nombreux cas, la fertilisation N augmente le rendement en grain, mais, au-delà du niveau de fertilisation optimale, l'efficacité de l'utilisation du N apporté diminue avec l'augmentation de la fertilisation N (Levy et Brabant 2016; Levy et Schwaerzel 2009).

### 2.1.4 Fertilisation et qualité de la récolte

Les céréales à paille trouvent des débouchés dans plusieurs domaines. La majorité de la production est utilisée soit en panification (blé, seigle, épeautre), soit pour l'affouragement (triticale, orge, blé fourrager, avoine). Une part marginale est écoulee vers d'autres produits tels que biscuits, flocons, soupes, etc. En Suisse, les variétés de blé sont classées selon leur aptitude à la panification et sont recommandées pour les divers objectifs d'utilisation. Pour le blé de classe Top (les variétés de haute gamme destinées à la panification), un paiement selon la teneur en protéines a été récemment instauré par la filière (Sonderegger et Scheuner 2014). Les exigences de qualité requises pour les transformateurs sont spécifiques à chaque utilisation.

#### 2.1.4.1 Influence de la fertilisation azotée sur la qualité du blé panifiable

Le choix variétal explique un tiers de la variabilité de la teneur en protéines du blé (Levy et Brabant 2016). L'impact de la fertilisation N sur le taux de protéines est du même ordre de grandeur. La différence entre les situations de carence en N (0 kg N/ha) et celles où les apports sont proches de la norme (140 kg N/ha) est plus marquée pour la teneur en protéines que pour le rendement (Levy et Brabant 2016). Même si la fertilisation N augmente la teneur

Tableau 1. Effet de la fertilisation N sur les caractéristiques du blé et rôle de ces critères selon sa destination.

Critère	Effet de la fertilisation N	Appréciation selon la destination		
		Blé panifiable	Blé biscuitier	Blé fourrager
Poids à l'hectolitre	o/+	o/+	o/+	o/+
Poids de mille grains	o	o	o	o
Teneur en protéines	+	+	-	+
Zeleny1	+	+	-	o
Dureté du grain	+	+	-	o
Absorption en eau de la farine	o/+	o/+	o/-	o
Stabilité de la pâte	+	+	-	o
Perte de consistance de la pâte	+	+	-	o
Ténacité de la pâte	+	+	-	o
Ténacité/extensibilité de la pâte	+	+	+	o
Gélatinisation maximale	+	o/+	o	o

o sans influence; + influence positive; - influence négative.

1 Le Zeleny reflète la qualité des protéines et leur aptitude à gonfler dans un milieu lactique acide.

en protéines, une teneur plus élevée ne garantit pas forcément une meilleure qualité boulangère (Brabant et Levy 2016). Une fertilisation N plus importante engendre une modification de la composition des protéines: le taux de gluten humide augmente, tandis que l'indice de gluten (indicateur de la qualité du gluten) diminue (Brabant et Levy 2016). Le Zeleny augmente avec un fractionnement en trois apports mais ne réagit plus à une intensification. Le poids à l'hectolitre est essentiellement déterminé par la variété, mais une fertilisation N plus importante peut influencer positivement ce critère (Levy *et al.* 2007; Levy et Brabant 2016).

#### 2.1.4.2 Influence de la fertilisation azotée sur la qualité du blé biscuitier

La qualité de la farine exigée par la filière biscuitière est très différente et souvent opposée à celle que recherche la filière panification. La filière biscuitière demande un blé avec une faible teneur en protéines, un faible pouvoir d'hydratation, une forte extensibilité et une faible élasticité de la pâte. Ces paramètres sont influencés non seulement par la variété, mais également par la fertilisation N (tableau 1).

#### 2.1.4.3 Influence de la fertilisation azotée sur la qualité des céréales fourragères

Diverses espèces céréalières sont utilisées dans l'affouragement, notamment l'orge et le triticale. Depuis la libéralisation du marché céréalier en 2001, le blé de qualité boulangère déclassé a été remplacé par des variétés de blé fourrager à haut rendement, mais à basse teneur en protéines. Actuellement, l'appréciation de la qualité des céréales fourragères se fait essentiellement par le poids à l'hectolitre, un critère facilement mesurable, mais peu fiable (tableau 1). Le poids à l'hectolitre est affecté très marginalement par la fertilisation N (Charles *et al.* 2012). D'autres critères, plus spécifiques à chaque utilisation (teneurs en protéines, en lysine, en acides gras, etc.), jouent un rôle important. L'indice Pufa-Mufa (IPM), indiqué systématiquement pour les variétés d'orge d'automne (Courvoisier *et al.* 2015), est plus élevé pour les orges que pour les blés, mais ne dépend pas de la nutrition N de la plante. De la même façon, la viscosité des céréales fourragères est cruciale pour l'affouragement des monogastriques, car elle exerce un effet négatif entre autres sur l'absorption des nutriments (Levy *et al.* 2013); mais, elle n'est pas non plus influencée par la fertilisation N.

#### 2.1.5 Fertilisation et maladies

Plusieurs études (Neumann *et al.* 2004; Olesen *et al.* 2003; Jordan *et al.* 1989; Smiley et Cook 1973) montrent que non seulement le niveau de la fertilisation, mais aussi le moment de l'application et la forme chimique de l'engrais appliqué influencent le développement des maladies des céréales. Des conditions d'abondance en N favorisent le développement de l'oïdium (*Blumeria graminis*), de la rouille brune (*Puccinia triticina*) et la pullulation des pucerons sur l'épi (Charles *et al.* 2011; Mascagni *et al.* 1997; Gash 2012). D'autres maladies, telle que la fusariose sur épi, ne sont pas affectées par la forme chimique, ni par le niveau de la

fertilisation N (Krnjaja *et al.* 2015; Lemmens *et al.* 2004). Toutefois, limiter la disponibilité en N ou en autres éléments nutritifs ou maintenir un stress pour la culture n'est certainement pas une solution. Certaines études (Buschbell et Hoffmann 1992; Olesen *et al.* 2000) montrent que des cultures affaiblies sont plus facilement attaquées par des pathogènes et des ravageurs.



Parcelle de pomme de terre (photo: Agroscope).

## 2.2 Pomme de terre

### 2.2.1 Caractéristiques générales

La pomme de terre couvre 11'330 ha en Suisse (Swisspatat 2015), dont 1'500 ha de multiplication de plants. La production de variétés de consommation représente 60 % et les variétés pour la transformation industrielle 40 %.

La pomme de terre se plante généralement en Suisse entre fin mars et début mai. Elle met deux à trois semaines avant de sortir de terre en fonction de son niveau de pré-germination et de la température extérieure. Il faut ensuite plusieurs semaines pour que le feuillage recouvre complètement le sol. Le système racinaire est très superficiel et principalement concentré dans les 30 premiers centimètres sous la surface du sol. Il existe des différences importantes de masse racinaire entre les variétés, ce qui explique pourquoi certaines valorisent mieux les éléments nutritifs (Iwama 2008; Sinaj *et al.* 2014). Ces différences variétales sont assez stables quels que soient le lieu, le type de sol, la fertilisation ou la densité de plantation. Dans des conditions de croissance favorables, c'est-à-dire sans déficit hydrique ni carence, les différences de masse racinaire sont surtout liées à la précocité de la variété. Les variétés tardives ont des racines qui s'allongent plus longtemps, atteignent une masse racinaire plus importante et pénètrent plus profondément dans le sol, parfois jusqu'à un mètre (Iwama 2008). La température joue également un rôle important sur le développement du système racinaire avec un optimum proche de 20 °C (Sattelmacher *et al.* 1990).

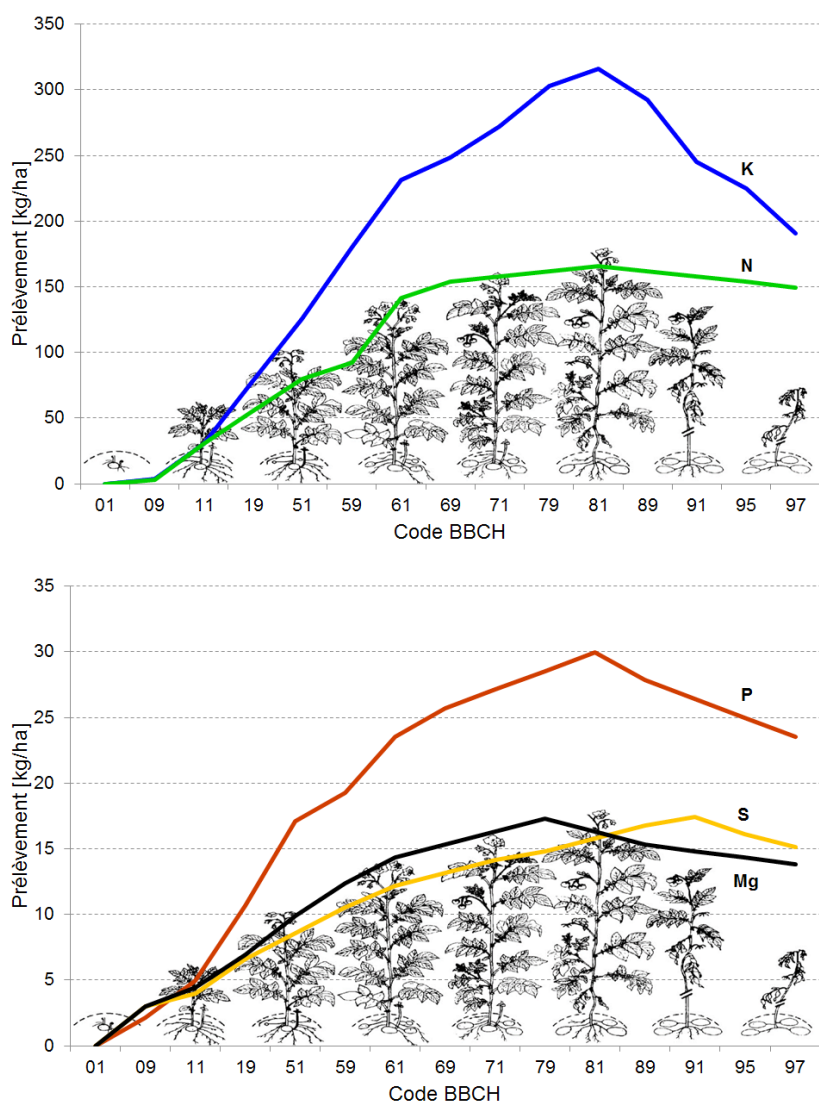


Figure 2. Courbe d'absorption des éléments nutritifs (N, P, K, S, Mg) par la pomme de terre (variété José – rendement 45t/ha) (SCPA 1995) en fonction du développement physiologique de la plante (échelle BBCH de Hack 1993).

Tableau 2. Influence de la fertilisation N, P et K sur la qualité des tubercules de la pomme de terre.

Critère de qualité	N	P	K
Proportion de tubercules commercialisables (taille)	+	o	+
Résistance aux chocs + taches plombées	-	+	+
Teneur en amidon	-	+	o/+
Teneur en matière sèche	-	o	o/+
Noircissement interne	-	o	+
Brunissement à la friture (taux de sucre)	-	o	o/+
Noircissement après cuisson	o/-	o/+	o/+
Perte de poids à la conservation	o	o	o

o sans influence ; + influence positive ; - influence négative.

### 2.2.2 Besoins en éléments nutritifs

La pomme de terre est une culture exigeante en N, mais également en P et en K (figure 2). On estime ainsi l'exportation d'éléments minéraux à 0,45–0,90 kg de P et 3,5–5,0 kg de K par tonne de tubercules. Elle est également sensible aux carences en manganèse (Mn) et en bore (B). En général, des apports élevés en N favorisent un développement foliaire important et prolongent la période de végétation, alors que des apports en N réduits accélèrent la sénescence de la plante et ont pour effet d'augmenter la teneur en matière sèche (principalement composée d'amidon) des tubercules (Westermann et Kleinkopf 1985; Cao et Tibbitts 1998).

Le P est un élément essentiel pour la pomme de terre. Une impasse sur la fertilisation P peut se justifier si l'analyse de sol montre une réserve suffisante en P disponible. Il faut toutefois être prudent car une carence en P peut engendrer une perte de rendement allant jusqu'à 10 % (Ryckmans 2009). Le rendement maximal est obtenu lorsque suffisamment de P est disponible pour la plante au début de son cycle végétatif et pendant toute la période de grossissement des tubercules. Les prélèvements de P augmentent rapidement pendant la période d'initiation de la tubérisation, ils sont stables pendant la période de grossissement des tubercules et s'arrêtent à la sénescence de la plante (figure 2; Ryckmans 2009, Tindall *et al.* 1993).

La pomme de terre est une des cultures les plus exigeantes en K. Une impasse sur la fertilisation K n'est pas recommandée car elle peut conduire à des pertes de rendement allant jusqu'à 40 % dans le cas où le sol n'est pas bien pourvu (Allison *et al.* 2001b). La quantité de matière sèche (principalement composée d'amidon) des tubercules diminue lorsqu'on applique davantage de K, l'effet étant plus marqué quand le K est appliqué sous forme de chlorure plutôt que sous forme de sulfates (Allison *et al.* 2001b). Le pic d'utilisation du K est localisé pendant la période de grossissement des tubercules, en fin de floraison de la plante (figure 2; Kolbe et Stephan-beckmann 1997; SCPA 1995). Les variétés qui présentent un développement racinaire important absorbent mieux le K (Karam *et al.* 2009; Trehan et Sharma 2002).

Le magnésium (Mg) intervient au niveau de la photosynthèse et du métabolisme du N et du P. Il est vital pour les plantes (Colomb 1992). Sur l'ensemble du cycle végétatif, c'est le sol qui fournira la majorité du Mg à la

culture. Dans les sols carencés, les gains relatifs de production suite à une fertilisation magnésienne sont modérés et rarement supérieurs à 15 % (Allison *et al.* 2001a; Colomb 1992). Plusieurs études ont montré que l'augmentation des apports de K avait pour effet de diminuer la concentration en Mg dans les pétioles et les tubercules (carence induite). Cependant, il n'y a pas de preuves scientifiques que cette compétition entre K et Mg ait un effet sur le rendement.

Les besoins en S sont faibles (figure 2) et la phase de croissance de la plante coïncide avec la phase principale de minéralisation du S organique du sol, ce qui permet au sol de couvrir la majorité des besoins de la plante (Cohan 2014; Fritsch 2003).

### 2.2.3 Fertilisation et qualité des récoltes

La fertilisation N fait partie des facteurs déterminants de la qualité de la pomme de terre (tableau 2) (Reust *et al.* 2006). Elle doit être différenciée selon le type de sol, les apports organiques, les conditions climatiques et les objectifs d'utilisation de la pomme de terre. Le fractionnement de la fertilisation N (tableau 26) influence la qualité des tubercules et il est ainsi judicieux de faire la dernière application de N avant la formation des tubercules. Une fertilisation N excessive prolonge la durée de végétation, ce qui retarde la sénescence des plantes et la maturation des tubercules. La peau des tubercules reste donc fragile, ce qui les rend plus sensibles aux dommages mécaniques à la récolte et compromet leur bonne conservation (flétrissement accéléré au stockage).

La fertilisation P et K influence aussi la qualité des tubercules de la pomme de terre (tableau 2). Un apport localisé en P à la plantation accélère le développement des pommes de terre.

### 2.2.4 Fertilisation et maladies

Un excès de N favorise le mildiou lorsque la pression du pathogène est importante. En effet, le N va permettre le développement d'un feuillage abondant qui conserve l'humidité propice au mildiou. De plus, les fongicides atteignent difficilement les strates inférieures du feuillage qui ne sont dès lors pas protégées contre les infections (Agu 2006; Kolbe et Stephan-beckmann 1997).

Dans les sols fortement calcaires, le risque de gale commune est important. Ce risque peut être atténué en ayant recours à des engrais ayant une action acidifiante, tels que le sulfate d'ammonium et/ou le sulfate de potassium (Colin et Goffart 1998; Pavlista 2005). Les engrais organiques riches en paille sont déconseillés pour les pommes de terre en raison des risques de développement de maladies telles que le rhizoctone et la gale commune.



Parcelle de colza (photo: Agroscope).

## 2.3 Cultures oléagineuses (colza et tournesol)

### 2.3.1 Caractéristiques générales

Le colza d'automne est la principale culture oléagineuse en Suisse avec environ 23'000 ha. Apparu en Suisse dans le milieu des années 1990, le tournesol, grâce à la sélection d'hybrides précoces performants, couvre environ 3'500 ha. Ces deux cultures sont très différentes quant à leur rôle dans la rotation et leurs besoins en éléments nutritifs.

Semé entre fin août et début septembre, le colza peut absorber de grandes quantités de N en automne, ce qui lui permet de valoriser cet élément issu d'apports organiques, mais aussi d'agir comme piège à nitrates pendant cette période. Le colza absorbe du N jusqu'après la floraison, puis c'est la remobilisation des réserves contenues dans la tige et les feuilles qui assurent l'accumulation de protéines dans le grain. Cette culture annuelle couvre le sol sur une très longue période (10–11 mois), puisque la récolte aura lieu généralement en juillet. Le colza possède un système racinaire pivotant, sensible aux zones compactées et à une semelle de labour.

Le tournesol est une culture de printemps à fort développement végétatif, assez tolérante au stress hydrique et traditionnellement cultivée dans les régions chaudes. Moins sensible aux basses températures que le maïs, le tournesol peut être semé un peu plus tôt, dès le mois d'avril. Durant les premiers jours suivant la levée, la mise en place du système racinaire est favorisée par rapport à la partie aérienne. Son cycle est d'environ 130 à 150 jours. Le tournesol possède une racine pivotante très sensible aux accidents structuraux dans la couche travaillée et un vaste réseau de racines secondaires. S'il ne rencontre pas d'obstacle, il peut explorer le sol jusqu'à 2 m de profondeur, ce qui lui confère une certaine autonomie quant à son approvisionnement en éléments nutritifs et une bonne tolérance au stress hydrique.

### 2.3.2 Besoins en éléments nutritifs

Les besoins en N du colza sont élevés (figure 3). Il peut en absorber une quantité importante en automne. Une partie de cet azote ne restera pas dans la plante à cause de la chute des feuilles en hiver, mais pourra partiellement être remobilisée au printemps. La fertilisation apportée au printemps vise à compléter l'absorption de N de l'automne. Par conséquent, les besoins en N peuvent beaucoup varier en fonction de la quantité déjà absorbée par la plante à la fin de l'hiver. L'état du couvert est pris en compte dans le système de calcul de la fertilisation N développé par «Terres Inovia» (France) qui permet de réduire l'apport en N sur les «gros» colzas sans pénaliser le rendement (Lagarde et Champolivier 2006). Il est conseillé d'apporter le N en deux fois, à partir de la reprise de végétation. Une fertilisation en automne, sauf rares exceptions, est fortement déconseillée, une trop grande croissance des plantes avant l'hiver n'étant pas souhaitable et pouvant générer une élévation de la tige. Ces exceptions concernent par exemple une fertilisation N après enfouissement des pailles d'un précédent céréalier.

Le colza fait partie des cultures exigeantes en P tout au long de son cycle (figure 3), mais il mobilise difficilement les réserves du sol. Des carences peuvent donc apparaître lorsqu'on fait l'impasse sur la fertilisation.

Le K est un élément essentiel pour le colza (figure 3). Il en absorbe une quantité importante, qui sera en majorité stockée dans les tiges et feuilles sous une forme soluble et libérée pour la culture suivante lors de la décomposition des résidus de récoltes.

Les besoins du colza en S sont importants au printemps. Lorsque ses besoins ne sont pas couverts par la minéralisation du S organique du sol

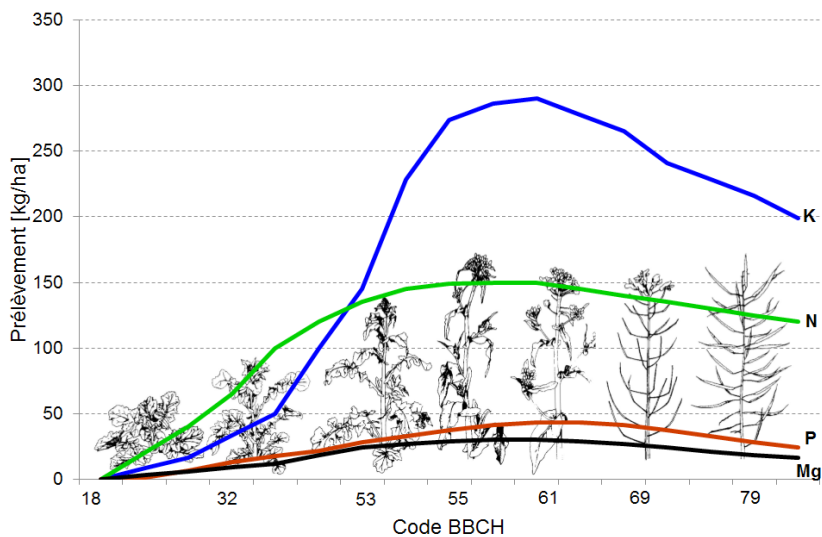


Figure 3. Courbe d'absorption des éléments nutritifs (N, P, K, Mg) par le colza en fonction du développement physiologique de la plante (SCPA 1995; échelle BBCH de Hack 1993).



Plantes de tournesol (photo: Agroscope).

(dépendante du type de sol et des conditions climatiques), une fertilisation S sous forme de sulfates est essentielle dès la sortie de l'hiver pour éviter des carences pouvant mener à des pertes de rendement importantes. Lorsque de la matière organique est régulièrement apportée sur la parcelle, le risque de carence est limité et l'apport de S peut s'avérer superflu.

Les besoins en N du tournesol sont modérés et en grande partie couverts par l'absorption de N dans les couches profondes du sol lorsqu'il est bien enraciné. On estime les besoins à environ 45 kg de N par tonne. L'apport de N se fait au semis. Une fertilisation trop importante du tournesol n'est pas souhaitable, car elle peut favoriser le développement de maladies, retarde la maturité et entraîne une diminution de la teneur en huile. Il est parfois possible de faire une impasse sur la fertilisation N (chapitre 3.1.3).

Le tournesol est moyennement exigeant en K et peu exigeant en P. Les carences peuvent néanmoins freiner la croissance de la plante et limiter son rendement. Elles sont possibles si le sol est pauvre ou si l'enracinement est mauvais.

### 2.3.3 Fertilisation et qualité de la récolte

La richesse en huile des cultures oléagineuses et la teneur en glucosinolates de la graine de colza sont deux paramètres de qualité importants qui peuvent être influencés par la fertilisation. La richesse en huile est aussi influencée par de nombreux facteurs dont la variété, les conditions environnementales et la fertilisation N. En Suisse, ce paramètre n'est actuellement pas pris en compte dans la rémunération des récoltes.

Tableau 3. Effets de la fertilisation N et S sur la richesse en huile et la concentration en glucosinolates du colza.

Fertilisation	Huile	Glucosinolates
Fertilisation N	-	o
Fertilisation S (risque de carence moyen/élevé)	+	+
Fertilisation S (risque de carence faible)	o	+

o sans influence ; + augmentation ; - diminution.

### 2.3.3.1 Influence de la fertilisation azotée et soufrée sur la richesse en huile

Le rendement du colza évolue positivement (jusqu'à un optimum) et la teneur en huile décroît avec une fertilisation N croissante (tableau 3). Par conséquent, le rendement en huile augmente avec la fertilisation N jusqu'à un optimum qui est plus bas que pour le rendement en grains. La teneur en huile diminue de 0,3 à 1,2 point d'huile avec 40 kg de N de plus que la dose optimale (Champolivier et Reau 2005). Une tendance similaire peut être observée chez le tournesol.

La fertilisation S du colza peut avoir un effet bénéfique sur la teneur en huile de la récolte lorsque le risque de carence en S est modéré. Par contre, si le risque de carence est faible (aucune fertilisation S recommandée), un apport de S n'a aucun effet sur la richesse en huile (Pellet *et al.* 2003a).

### 2.3.3.2 Influence de la fertilisation soufrée sur la concentration en glucosinolates

Les glucosinolates sont des composés soufrés qui pénalisent la qualité du tourteau de colza destiné à l'affouragement des monogastriques (porcs et volailles). La teneur maximale de la graine est fixée en Suisse à 20  $\mu\text{mol/g}$ . De grandes différences sont observées entre les variétés, mais la disponibilité en S du sol influence également la concentration en glucosinolates. Dans une série d'essais réalisés sur des sols à risque faible à moyen de carence en S, on a constaté une forte hausse des teneurs en glucosinolates avec l'augmentation de la fertilisation S (tableau 3). Cet effet est particulièrement marqué dans les situations requérant une fertilisation S (Pellet *et al.* 2003a). Une fertilisation S trop importante doit donc être évitée.

### 2.3.4 Fertilisation et maladies

Pour le colza, Söchting et Verreet (2004) ont constaté qu'une fertilisation N importante favorisait la sclérotiniose, mais n'avait pas d'effet sur le phoma. Au contraire, Aubertot *et al.* (2003) ont montré qu'une forte disponibilité en N à l'automne pouvait favoriser le développement du phoma.

Grâce à son enracinement profond, le tournesol peut mobiliser les réserves en N des couches profondes du sol qui lui fournissent une grande partie de ses besoins. Une fertilisation trop importante entraîne un développement important de la végétation qui peut augmenter le risque de verse et le développement de maladies. Debaeke et Estragnat (2003) ont montré que l'intensification de la fertilisation N augmentait le nombre de tiges attaquées par phomopsis lorsque la pression d'inoculum était faible. À l'inverse, lorsque l'inoculum est bien présent et les conditions d'humidité favorables, une carence en N peut favoriser la progression de la maladie dont la sévérité est accentuée par la densité de peuplement. Le phoma de la tige serait également influencé par la disponibilité en N, contrairement au phoma du collet (Debaeke et Perez 2003). Enfin, la sclérotiniose, essentiellement favorisée par les conditions météorologiques ou l'irrigation, n'est que partiellement favorisée par la fertilisation N (Mestries *et al.* 2011).



Gosses de pois protéagineux (photo: Agroscope).

## 2.4 Protéagineux

### 2.4.1 Caractéristiques générales

Le pois, le soja, la féverole et le lupin sont les principaux protéagineux cultivés en Suisse. Le pois est largement dominant avec environ 3'700 ha, suivi de la féverole (465 ha) et du lupin (80 ha). Le soja, cultivé pour son huile et ses protéines, occupe environ 1'400 ha. Toutes ces cultures fixent le N de l'air grâce à leurs nodosités. On peut distinguer ces cultures par la structure de leur système racinaire: le pois a une racine pivotante peu développée et des racines secondaires et tertiaires sur lesquelles les nodosités se développent. Pour cette raison, cette culture est sensible aux défauts de structure et de compactage du sol. Le lupin et la féverole possèdent des pivots importants leur conférant un rôle de structuration du sol. La capacité du lupin à modifier le pH autour de sa rhizosphère (jusqu'à deux unités) lui permet de dissoudre des formes d'éléments nutritifs (P, K, Zn, etc.) non disponibles et de les rendre accessibles pour la plante. Le soja a également une racine pivotante qui peut s'enfoncer profondément dans le sol, mais qui se limite généralement à la zone labourée. Avec quatre rangées de racines secondaires portant elles-mêmes des ramifications, la masse racinaire du soja est en grande partie concentrée dans les 15–20 premiers centimètres du sol.

Parmi les pois, on distingue deux types variétaux: les variétés d'hiver, semées dès mi-octobre et récoltées début juillet, et les variétés de printemps, un peu plus sensibles aux basses températures, semées en février et récoltées en juillet. Le soja est une culture de printemps qui doit être semée dans un sol réchauffé (en mai) et qui sera récoltée à l'automne.

### 2.4.2 Besoins en éléments nutritifs

Le pois, le lupin, la féverole et le soja, comme toutes les légumineuses, n'ont pas besoin de fertilisation N. L'inoculation du lupin et du soja est nécessaire car les bactéries dans leurs nodosités (*Rhizobium*) sont spécifiques. Une culture régulière sur une parcelle permet aux bactéries de se maintenir dans le sol d'une culture à l'autre. Occasionnellement, les protéagineux peuvent recevoir des engrais de ferme qui n'auraient pas pu être valorisés ailleurs. Comme le pois, la féverole est moyennement exigeante en P et K. Le lupin et le soja sont faiblement exigeants en P et moyennement exigeants en K.

Les légumineuses ont un effet bénéfique sur la fertilité des sols. Le pois constitue un excellent précédent pour les cultures d'hiver (colza, blé) pour lesquelles il permet une économie de N. Celle-ci est particulièrement marquée pour les cultures semées tôt à la fin de l'été, comme le colza qui peut absorber de grandes quantités de N en automne (Charles et Vullioud 2001).



Epi de maïs à maturité (photo: Agroscope).

## 2.5 Maïs

### 2.5.1 Caractéristiques générales

Sur le plan mondial, le maïs est une source alimentaire importante pour l'homme. En Suisse, il est cultivé essentiellement pour l'affouragement des animaux. Parmi les espèces des grandes cultures de Suisse, le maïs totalise quelque 61'000 ha et se place en troisième position après les céréales panifiables et les autres céréales fourragères. Selon la destination de la récolte, c'est le rendement et la qualité de la plante entière (pour l'ensilage ou l'utilisation en vert) ou le rendement en grain (maïs grain) et la qualité de celui-ci qui sont déterminants. La qualité que l'on attend du maïs dépend des autres composants de l'affouragement.

Le système racinaire comprend un très grand nombre de racines adventives qui naissent sur les nœuds situés à la base de la tige, formant des couronnes successives, tant sur les nœuds enterrés que sur les premiers nœuds aériens, dans une zone où les entrenœuds sont très courts. Les racines aériennes contribuent à l'ancrage de la plante qui résiste ainsi mieux à la verse. Durant le cycle végétatif de la plante, l'importance des racines adventives des couronnes supérieures diminue plus ou moins selon les variétés, mais elles prennent la fonction de racines nourricières dès qu'elles pénètrent dans la terre. L'enracinement du maïs dans le profil du sol dépend de la nature du sol et des disponibilités en éléments nutritifs. Le développement latéral des racines peut atteindre un mètre et elles peuvent pénétrer jusqu'à 2,5 m de profondeur. Ce développement dépend de l'état du sol, de sa structure (profondeur utile, tassement) et des disponibilités en eau. Jusqu'au stade 6 feuilles, le maïs croît plutôt lentement et ses besoins en nutriments sont modestes (figure 4). Par la suite, les besoins en nutriments augmentent, mais la disponibilité de ceux-ci dans le sol s'accroît aussi (notamment celle de l'azote libéré par minéralisation). Lorsque le développement des plantes progresse, les racines explorent des zones plus profondes. En revanche, au cours des premières phases de développement, une fertilisation localisée au semis peut suppléer un manque de disponibilité de certains éléments peu mobiles (P) ou peu disponibles dans les sols qui se réchauffent lentement. Dans ce contexte, il y a lieu de mentionner la possibilité de favoriser l'action de microorganismes du sol (mycorrhizes), et par là le développement juvénile du maïs, par un choix judicieux de la rotation des cultures ou par des cultures intermédiaires appropriées. La formation du grain commence à partir du moment où les racines cessent de croître (Arnon 1975).

### 2.5.2 Exigences vis-à-vis du sol et des éléments nutritifs

En soi, le maïs est peu exigeant en ce qui concerne le sol; toutefois, des conditions favorables se répercutent positivement sur ses performances. Le pH idéal se situe entre 5,3 et 7,0. Les facteurs limitant la culture du maïs sont plutôt de nature climatique que pédologique (Holzkämper *et al.* 2015). Les sols les plus favorables sont ceux de type milour, profonds, bien aérés et se réchauffant rapidement au printemps. Les sols sableux se réchauffent rapidement et sont favorables au démarrage du maïs, cependant, les risques de déficits hydriques et de manque d'éléments nutritifs sont élevés à cause d'une faible capacité de rétention. La culture du maïs en sols humifères est possible, mais avec des risques de gels tardifs au printemps et de gels précoces en automne. Dans les régions à faible pluviométrie, les sols de texture lourde sont les plus favorables grâce à leur capacité de rétention en eau élevée. Les sols compactés et souvent affectés par des eaux stagnantes sont défavorables à la culture du maïs. Il en va de même des sols battants dans lesquels le risque d'érosion est très élevé à cause des interlignes larges (70–80 cm) de la culture, ceci d'autant plus si la pente est prononcée et la stabilité des agrégats du sol faible. Les sols à faible teneur en matière organique présentent un risque accru qui peut être amplifié par une préparation trop fine du lit de semences.



Le maïs valorise très bien les engrais de ferme. Ses besoins en nutriments en fonction de son cycle de développement correspondent très bien à la période où il y a le plus d'azote minéral disponible dans le sol. En conditions favorables et en présence de suffisamment d'eau, une culture de maïs peut, au cours de sa phase de développement la plus intense, absorber jusqu'à 5 kg N/ha/jour (figure 4).

La phase la plus délicate de l'approvisionnement en P se situe durant la période juvénile (4<sup>e</sup> à 10<sup>e</sup> semaine de croissance). Le système racinaire étant encore peu développé à ce stade-là, un apport de P facilement disponible dans la zone de la semence peut favoriser le bon départ de la culture. De la fécondation jusqu'à la maturité, la quantité totale de P absorbé par les racines atteint quelque 63 % du total (Arnon 1975).

Une bonne fertilisation en K favorise une bonne valorisation de l'eau et améliore tant la résistance au sec qu'au froid. Le K stimule la formation d'hydrates de carbone, augmente la résistance à la verse et améliore la résistance aux maladies et aux insectes. Le gros des besoins se situe entre le développement de la 6<sup>e</sup> feuille et la fin de la floraison (figure 4). Durant cette période, l'absorption peut atteindre 10 kg K/ha/jour.

Les prélèvements en Mg sont modestes en regard des autres éléments nutritifs. Dans les exploitations avec du bétail, les besoins sont en grande partie couverts par un apport de purin. Dans les autres cas, il faut recourir à de la chaux magnésienne, de la kiesérite ou d'autres engrais du commerce.

Les prélèvements en S sont d'environ 30 kg/ha, normalement couverts par des apports réguliers d'engrais de ferme, le complément pouvant être fourni par la minéralisation à partir des réserves du sol. En sols légers, un engrais soufré peut être nécessaire, sachant que le S peut être facilement lessivé, comme l'azote.

### 2.5.3 Fertilisation et qualité

La qualité du maïs d'ensilage est déterminée par celle des épis (teneur en amidon) ainsi que par la digestibilité du reste de la plante. La densité des plantes influence la qualité: les épis sont moins développés en peuplement dense qu'en peuplement faible. En général, une élévation du niveau de fertilisation azotée augmente la part d'épis secondaires complètement développés. Ce n'est

cependant pas souhaité dans tous les cas car les épis secondaires incomplètement formés sont plus sensibles aux fusarioses. Une fertilisation N et P trop poussée peut favoriser la verse si les plantes ne disposent pas de suffisamment de K (Arnon 1975). Une fertilisation azotée renforcée peut faire augmenter la teneur en protéines du maïs grain (Arnon 1975; Buchner et Sturm 1985). Environ 60 % de l'azote nécessaire à la formation du grain sont transférés des feuilles, 10 % proviennent des spathes et 20–25 % des tiges et d'autres parties de la plante. Il en découle qu'à fertilisation azotée réduite, il y a moins d'azote à disposition pour approvisionner l'épi, ce qui affecte finalement tant le rendement que la qualité. Compte tenu de la forte croissance des plantes au moment de la floraison, un déficit hydrique à ce stade-là se répercute sur la formation de biomasse et sur sa qualité (Arnon 1975).

### 2.5.4 Fertilisation et maladies

La disponibilité des éléments nutritifs peut influencer la sensibilité du maïs aux maladies. En général, la tolérance d'une plante sous-alimen-

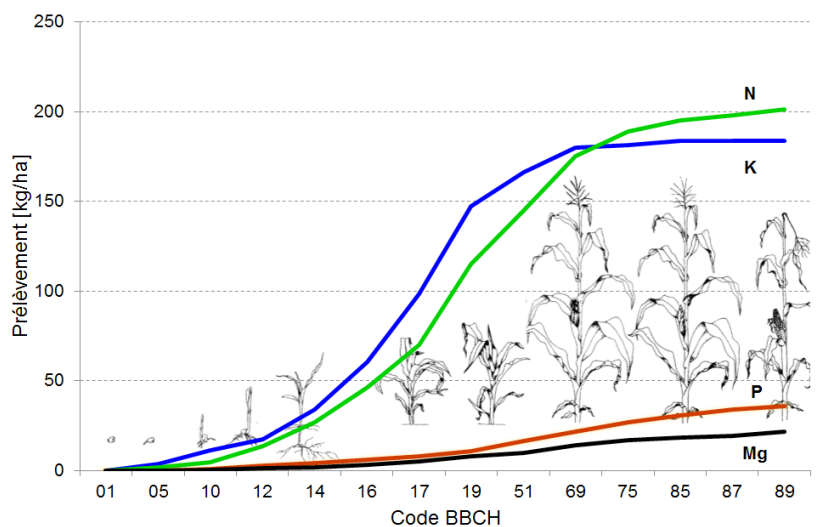


Figure 4. Somme des éléments nutritifs absorbés par le maïs jusqu'au stade de développement 89. (Adapté de Buchner et Sturm 1985 et UNIFA, 2015; échelle BBCH de Hack, 1993).

Tableau 4. Influence de carences ou d'excès de N, K, Mg et S sur les maladies du maïs (Datnoff et al. 2009).

Disponibilité des nutriments	Maladie/dysfonction	Agent pathogène
Excédent de N	Cercosporiose	<i>Cercospora zeae-maydis</i>
Carence en N	Fusariose des tiges	<i>Gibberella zeae</i> (Schwein.) Petch*; <i>Diplodia maydis</i> (Berk.) Sacc.
Carence en N	Formation d'aflatoxines	Groupe <i>Aspergillus-flavus</i>
Carence en K	Helminthosporiose	<i>Exserohilum turcicum</i>
Carence en K	Fusariose des tiges	<i>Fusarium moniliforme</i> ; <i>Gibberella zeae</i> (Schwein.); <i>Diplodia zeae</i> ; <i>Diplodia maydis</i> (Berk.) Sacc.; <i>Fusarium verticilloides</i> (Sacc) Nirenberg; <i>Colletotrichum graminicola</i> (Ces.) G. W. Wils; <i>Pythium</i> sp.; <i>Fusarium culmorum</i>
Excédent de Mg	Helminthosporiose	<i>Bipolaris maydis</i>
Carence en S	Diverses pourritures	<i>Pythium aphanidermatum</i> ; <i>Fusarium moniliforme</i> J. Sehd.

\* Aussi avec NH<sub>4</sub> en pH acide.

tée est affaiblie. Dans la plupart des cas, la sous-alimentation favorise les contaminations, mais il y a des exceptions (tableau 4).



Parcelle de betterave (photo: Agroscope).

## 2.6 Betterave sucrière

### 2.6.1 Caractéristiques générales

La betterave sucrière couvrait quelque 21'000 ha en 2014, pour une production de 1,9 million de tonnes de racines à 17,7 % de sucre, soit 340'000 tonnes de sucre. La betterave est une espèce bisannuelle, dont la culture se concentre sur la phase végétative (1<sup>re</sup> année), avec une croissance réagissant très directement aux conditions du milieu. Le démarrage de la culture est lent au printemps et expose le sol à des risques de battance et d'érosion. Durant l'été, la croissance dépend fortement de la disponibilité en eau (pluviométrie, profondeur du sol). Elle se poursuit durant l'automne et les quantités produites peuvent être considérables. La date de récolte est déterminée avant tout par les exigences de la transformation, les conditions du sol, l'état sanitaire de la culture et l'arrivée de l'hiver. La sélection variétale est particulièrement efficace puisque ces dernières décennies ont vu un accroissement annuel permanent du rendement de quelque 1 %. Une projection sur la base des récoltes 1995–2014 indique un rendement moyen de 90 t/ha pour 2020, avec un rapport de 1,9 entre la biomasse fraîche des racines et celle des feuilles. Le système racinaire de la betterave est particulièrement bien développé, tant au niveau de sa densité que de sa profondeur. La culture préfère des sols moyens, mais convient aussi pour les sols lourds. On la trouve également dans les terres noires, riches en matière organique. Son enracinement en profondeur permet à la culture de tolérer des périodes de sécheresse. Le pH optimal se situe entre 6,5 et 7,5.

### 2.6.2 Besoins en éléments nutritifs et qualité de la récolte

La fertilisation de la betterave vise à concilier rendement élevé en racines, haute teneur en sucre et taux d'extractibilité élevé pour maximiser la production de sucre et le revenu de la culture.

La fertilisation N vise à compléter le N provenant du sol pour satisfaire les 265 kg N/ha nécessaires pour sa biomasse aérienne et souterraine (90 t/ha de racines). La norme de fertilisation de 100 kg N/ha cache de fait une énorme variation des besoins en N entre 0 et 200 kg N/ha. Une bonne connaissance de la capacité de minéralisation de la matière organique (MO) du sol est donc requise pour optimiser les apports nécessaires. Une fertilisation N renforcée peut être envisagée prioritairement dans les sols peu pourvus en MO et dans les exploitations sans bétail. Une réduction de la fertilisation mérite d'être prise en considération sur les parcelles régulièrement amendées avec des engrais de ferme, sur les terres profondes, lourdes et riches en MO et lors de printemps chauds. Dans tous les cas, les apports de N sont à concentrer au début du cycle de croissance et au plus tard jusqu'au stade 6–8 feuilles, lorsque la minéralisation de la MO est encore limitée. Une fertilisation excessive et tardive réduit la qualité des betteraves en limitant l'enrichissement en sucre et en augmentant les teneurs en N nuisibles à l'extraction du sucre (tableau 5). Un programme de calcul des besoins totaux en N minéral permettant de prendre en compte de nombreux facteurs de correction de la fertilisation N est disponible sur le site internet du Centre betteravier suisse (<http://www.liz-online.de/CH/npro/frz/Npro-CH-frz.htm>).

Tableau 5. Influence de la fertilisation N, P et K sur la qualité de la betterave à sucre.

Qualité/ fertilisation	N	P	K
Teneur en sucre	–	o	+
Extractibilité	–	o	– (si excès)

o sans influence ; + influence positive ; – influence négative

La capacité de la betterave à bien explorer le sol facilite sa nutrition en K car elle peut puiser cet élément dans les couches profondes du sol. Pour tenir compte de cette efficacité, la fertilisation en K peut se contenter d'un apport correspondant à 80 % des quantités prélevées. Le K, de même que le sodium (Na), ont un effet positif sur la teneur en sucre. Toutefois, une disponibilité excessive de ces éléments est nuisible pour la qualité technologique de la betterave, conduisant à des pertes au raffinage.

Les besoins en oligo-éléments de la betterave concernent en particulier le bore (B) dont les carences provoquent la maladie physiologique du «cœur noir». Les besoins en manganèse (Mn) doivent aussi être considérés. Les apports éventuels ont lieu au plus tard au moment de la fermeture des lignes, sous la forme d'engrais foliaire.

Dans la mesure où la qualité est directement prise en compte dans le système de paiement des récoltes de betterave, il convient de prêter une attention particulière à la conduite de la fertilisation. Les bulletins de livraison fournissent un bon moyen de juger de la pertinence de la fertilisation pratiquée. Pour une betterave à 18 % de sucre brut, on compte environ 2 % de pertes au raffinage ce qui correspond à une extractibilité de 90 %. Les pertes au raffinage sont causées par des agents mélassigènes défavorables à l'extraction, parmi lesquels du N alpha-aminé (dans une fourchette acceptable de 0,6–1,2 mmol/100 g), des sels K (3–4 mmol/100 g), Na (0,1–0,3 mmol/100 g) ainsi que d'autres composés solubles non-sucre (composés organiques azotés, composés organiques non azotés, éléments minéraux). Toute valeur en dehors des fourchettes indiquées ci-dessus peut donc être utilisée pour corriger la fertilisation les années suivantes.



Travail du sol. À gauche semis direct, à droite semis après labour (photo: Agroscope).

## 2.7 Systèmes de culture et cultures intermédiaires

La réduction de l'intensité du travail du sol et le recours plus systématique aux couverts végétaux modifient le cycle des éléments nutritifs dans un sol agricole. Trois processus principaux peuvent être considérés pour une gestion de la fertilisation tenant compte du système de culture: (i) la réduction de l'intensité du travail du sol modifie la dynamique (temps) et l'ampleur (quantité) de la minéralisation de la MO du sol, (ii) un couvert végétal (culture intermédiaire) absorbe des éléments nutritifs de diverses origines et formes chimiques qui sont restitués ultérieurement au sol sous des formes disponibles pour la culture suivante et (iii) les légumineuses des couverts végétaux apportent du N au système via la fixation symbiotique. Ces processus peuvent conduire à adapter la fertilisation des cultures principales, tant pour garantir leur nutrition que pour améliorer l'efficacité de la fertilisation.

### 2.7.1 Effets de la réduction de l'intensité du travail du sol

Chaque intervention de travail du sol modifie la structure, l'aération et la température du sol, avec pour résultat une augmentation de l'activité microbienne et une augmentation de la minéralisation de la MO. Le type de sol et les conditions climatiques déterminent la dynamique de ces processus et les conséquences en termes de fertilisation.

Du fait d'un faible brassage, le travail minimal du sol ou le semis direct n'induisent pas de minéralisation supplémentaire. Comparativement à des travaux du sol intensifs, la libération du N dans la solution du sol lors de l'installation des cultures reste donc réduite pour ces systèmes. Pour les cultures de printemps, l'absence de travail du sol conduit à un retard de minéralisation de la MO d'autant plus prononcé que les sols restent froids plus longtemps durant la levée des cultures. Dès lors, une fertilisation N renforcée au semis peut s'avérer nécessaire, notamment pour assurer une installation et levée rapide des cultures. D'autre part, la minéralisation de la MO durant l'été et l'automne dépend principalement des précédents culturaux, de la teneur du sol en MO et de l'humidité du sol. Dans nos conditions, le N minéralisé en période estivale est généralement suffisant, voire en excès. Les incorporations de paille, le travail minimal du sol, les sécheresses prolongées peuvent induire des situations de faim d'azote pour les cultures d'automne précoces (couverts végétaux, colza, prairies temporaires, orge etc.). Les risques sont accrus pour les sols peu pourvus en MO, les exploitations sans bétail et celles pratiquant depuis peu de temps un travail réduit du sol. Il est possible de pallier ces manques de N par différentes mesures culturales: travail du sol (déchaumage), report de semis, culture de légumineuses (couvert associé, engrais vert) ou apport de N (recommandé en cas d'incorporation de paille).



Couvert végétal composé de plusieurs espèces (photo: Agroscope).

### 2.7.2 Effets des couverts végétaux sur le cycle des éléments nutritifs

Les couverts végétaux accroissent la disponibilité en éléments nutritifs pour la culture suivante par différents processus. Une production de biomasse importante et des teneurs élevées en nutriments permettent de stocker de

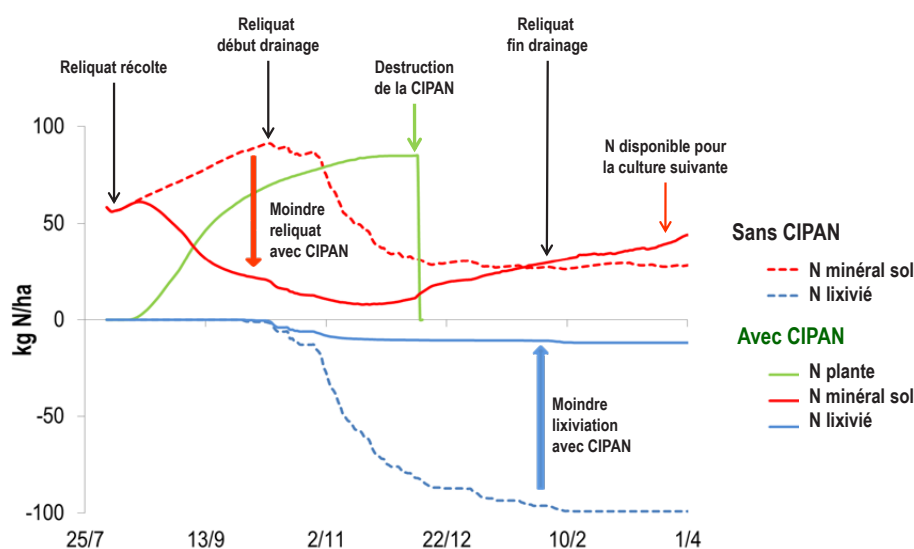


Figure 5. Gestion du N en interculture de fin juillet à fin mars (Justes et al. 2013). CIPAN: culture intermédiaire piège à nitrates.

grandes quantités d'éléments nutritifs dans le couvert végétal (Wendling et al. 2016). De plus, des pertes de nutriments sont évitées, tant par réduction du drainage que par protection du sol contre l'érosion. Ces éléments stockés dans le végétal sont ensuite restitués lors de la destruction du couvert. La gestion du N par les couverts végétaux concerne trois étapes successives: la gestion du reliquat de N de la culture précédente, l'absorption du N minéralisé durant l'interculture et la mise à disposition de ce N pour la culture suivante (figure 5).

L'extraction d'éléments nutritifs du sol difficilement accessibles pour certaines cultures et leur disponibilité pour les cultures suivantes jouent également un rôle. Dans les éditions précédentes des DBF, la teneur en éléments nutritifs des couverts végétaux et leurs prélèvements était représentés par une valeur générique. Le tableau 6 détaille désormais davantage ces valeurs. Dès lors, la gestion des éléments nutritifs vise à prendre compte la valeur

fertilisante de ces couverts végétaux lors de leur destruction.

La restitution du N contenu dans l'engrais vert (culture intermédiaire) pour la culture suivante dépend des parts respectives de carbone (C) et de N contenus dans la biomasse lors de son incorporation dans le sol. En effet, le rapport C/N détermine la vitesse de la minéralisation de la MO. Une teneur élevée en N favorise la décomposition du couvert et augmente la part de N disponible pour la culture suivante. A l'inverse, la décomposition d'un couvert ligneux ayant passé l'hiver et présentant une teneur élevée en C exige une absorption de N (immobilisation) par les microorganismes du sol. Cette préemption ralentit la minéralisation et conduit à une faible restitution de N. Elle représente une concurrence pour la nutrition des plantes et peut conduire à une faim d'azote similaire à celle occasionnée par une incorporation de paille (Maltas et al. 2012a et b; Maltas et al. 2013). Le tableau 7 expose différentes valeurs de restitution de N pour différents types de couverts en considérant le rapport C/N.

Pour valoriser au mieux son potentiel d'humification, un couvert devrait être détruit et mis en contact avec le sol lorsqu'il est encore frais (généralement avant l'hiver). En cas d'incorporation d'un engrais vert ligneux, il convient de réaliser ce travail suffisamment tôt avant la culture suivante, voire de renforcer la fertilisation N lors de l'installation de la culture suivante. Cela concerne en particulier les cultures de printemps après un couvert végétal ayant protégé le sol durant l'hiver. Le tableau 8 donne un récapitulatif des effets, atouts et limites des engrais verts pour ce qui concerne le N (Justes et al. 2013).

Les effets des couverts végétaux sur le cycle des autres éléments minéraux (P, K, Mg) sont généralement considérés comme neutres. Ceci revient à né-

Tableau 6. Prélèvements en éléments nutritifs pour un choix de cultures intermédiaires.

Engrais verts	Rendement	Prélèvements (kg/ha)			
	dt/ha MS <sup>1</sup>	N	P	K	Mg
Avoine rude	35	85	14	142	6
Crucifères	35	73	12	134	6
Phacélie	35	90	19	181	6
Pois fourrager	35	156	19	107	11

<sup>1</sup> Matière sèche.

Tableau 7. Estimation du N libéré ou bloqué pour la culture suivant une culture intermédiaire en fonction des espèces et de leur croissance (Justes et al. 2009).

Critère	Légumineuse	Moutarde	Graminée
Rapport C/N	10 à 15	15 à 20	20 à 30
N minéralisé en % du N de la culture intermédiaire	40 à 50	15 à 30	-15 à 15
Kg N/ha libérés ou bloqués			
- Croissance moyenne	20 à 25	7 à 15	-7 à 7
- Croissance forte	40 à 50	15 à 30	-15 à 15

Tableau 8. Récapitulatif des effets, atouts et limites des différents types de cultures intermédiaires (Justes *et al.* 2013).

Critère	Non-légumineuses graminées	Non-légumineuses crucifères	Légumineuses	Mélanges légumineuses et non-légumineuses
Exigences	Semis assez précoce Non ou peu gélives	Semis précoce Gélive selon l'espèce et la température	Semis très précoce Gélives	Adapter le mélange aux conditions pédologiques
Diminution de lixiviation	30 à 80 %	30 à 90 %	0 à 40 %	20 à 60 %
Effet N à court terme (N libéré en % N absorbé)	-20 à +10 %	-10 à +30 %	+10 à +50 %	+10 à +40 %
Atouts	Efficacité à haut niveau d'intrant en N	Large efficacité	Efficacité à bas niveau d'intrant en N	Efficacité intermédiaire, plasticité selon le milieu
Conditions déconseillées ou à proscrire	Sol argileux si destruction tardive	Sol argileux si non gélive ou si destruction tardive	Systèmes intensifs en N et apports d'effluents	Systèmes intensifs en N

glier la capacité de certaines espèces à extraire des nutriments du sol difficilement accessibles et de les rendre biodisponibles lors de leur décomposition. La prise en compte des quantités d'éléments nutritifs contenues dans les engrais verts (Büchi *et al.* 2016) vise à les valoriser davantage encore, notamment les espèces disposant d'une forte capacité de prélèvement. Dans un sol normalement ou bien pourvu en éléments nutritifs, il est désormais recommandé de considérer l'ensemble des éléments contenus dans la biomasse comme disponibles et déductibles de la fertilisation nécessaire pour la culture suivante. Dans des sols moins pourvus, on se contentera, par précaution, de considérer que l'effet des couverts est neutre sur le cycle des éléments nutritifs (P, K, Mg).

### 2.7.3 Effets des légumineuses dans les systèmes de culture

Les légumineuses sont de plus en plus cultivées comme couvert végétal, soit en couvert associé (avec le colza) soit en interculture (avec des céréales). En situation de croissance favorable, une légumineuse absorbe le N du sol (0–50 kg N/ha) et fixe symbiotiquement jusqu'à plus de 100 kg N/ha (Büchi *et al.* 2015). Cette quantité de N est intéressante comme alternative directe aux engrais N ou pour pallier des situations de faible minéralisation. Elle représente aussi un risque de perte sous la forme de nitrates. L'intérêt des légumineuses dans les systèmes de culture s'exprime de plusieurs façons. La valeur fertilisante d'un engrais vert à base de légumineuse pure peut atteindre de 40 à 80 kg N/ha (Büchi *et al.* 2015). L'installation d'une légumineuse comme couvert végétal après des pailles enfouies permet, dans des sols peu pourvus en MO ou en travail du sol minimal, l'obtention d'une couverture du sol efficace et une économie de N équivalente au N nécessaire pour la décomposition des pailles (Maltas *et al.* 2012a). Une légumineuse en couvert associée avec un colza restitue jusqu'à 30 kg N/ha à déduire de la fertilisation de la crucifère (Terres Inovia). L'efficacité d'une association céréale-protéagineux est supérieure à celle d'une culture pure (Bedoussac *et al.* 2015). Une utilisation plus fréquente des légumineuses dans les systèmes de culture mérite donc une attention particulière, tant au niveau des quantités de N fournies que de leur efficacité.

## 3. Normes de fertilisation

Les normes de fertilisation représentent les besoins en éléments nutritifs N, P, K et Mg des grandes cultures pour un rendement moyen. Ces normes sont corrigées selon différents facteurs relatifs aux plantes, au sol et/ou au climat.

Les prélèvements en N, P, K, Mg ainsi que les normes de fertilisation correspondantes sont présentés dans les tableaux 9 et 10. Le niveau de rendement pris en considération représente un niveau moyen atteint en Suisse. Il se base sur les résultats de la statistique agricole de l'Union suisse des paysans (USP 2014). Les teneurs en éléments nutritifs sont fournies par les résultats de plusieurs essais conduits par Agroscope. Les normes pour P, K, et Mg sont directement issues des prélèvements calculés à partir de ces données. Par contre, les normes pour N, basées sur les résultats d'essais conduits par Agroscope, ne représentent qu'une partie des prélèvements effectifs.

### 3.1 Fertilisation azotée

On peut définir la fertilisation N raisonnée comme une méthode permettant d'ajuster les apports d'engrais minéraux ou organiques aux besoins de la culture pour atteindre un objectif de production donné tout en prenant en compte les autres fournitures de N par le sol (COMIFER 2013). Cet ajustement de la norme tenant compte des besoins et des fournitures contribue à la maîtrise technico-économique de la production et à limiter les pertes de N dans l'environnement. L'offre du sol en N s'obtient en additionnant au N minéral présent à un moment donné tout le N libéré à partir de ce moment et durant la croissance de la culture, et en soustrayant le N perdu pendant cette même période. Toutefois, il faut encore tenir compte de l'évolution de la disponibilité du N dans le temps et dans l'espace ainsi que de la culture. En effet, une culture ayant un système racinaire profond aura accès à une quantité supérieure de N comparativement à une culture disposant d'un système superficiel. De plus, une jeune plante ne pourra pas non plus puiser le N présent en profondeur, en-dessous de ses racines (module 2).

**Tableau 9. Rendements de référence, prélèvements et normes de fertilisation en N, P, K, Mg pour les grandes cultures.**

Les normes de fertilisation en P, K et Mg tiennent compte de la capacité d'absorption des cultures (tableau 21).

Explications: Les données de bases servant au calcul sont le prélèvement par la récolte et les résidus en P, K et Mg.

Le prélèvement total est la somme des prélèvements des produits récoltés et des résidus de récolte.

Culture	Rendement de référence <sup>1</sup> dt/ha	Produit	Prélèvement basé sur le rendement référence				Norme de fertilisation			
			N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg	N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg
			kg/ha				kg/ha			
Blé d'automne (panifiable et biscuitier)	60	grain	121	21 (49)	22 (26)	7				
	70	paille	22	6 (13)	62 (75)	5				
	total		143	27 (63)	84 (101)	12	140	27 (63)	67 (81)	15
Blé fourrager d'automne	75	grain	130	27 (62)	27 (32)	9				
	75	paille	21	6 (14)	66 (80)	5				
	total		151	33 (76)	93 (113)	14	140	33 (76)	74 (90)	15
Blé de printemps	50	grain	101	18 (41)	18 (22)	6				
	60	paille	19	5 (11)	53 (64)	4				
	total		120	23 (52)	71 (86)	10	120	23 (52)	71 (86)	10
Orge d'automne	60	grain	89	22 (50)	27 (32)	7				
	60	paille	26	6 (13)	80 (96)	4				
	total		115	28 (64)	107 (128)	11	110	28 (64)	86 (103)	15
Orge de printemps	55	grain	81	20 (46)	25 (30)	6				
	55	paille	24	5 (12)	73 (88)	3				
	total		105	25 (58)	98 (118)	9	90	25 (58)	98 (118)	10
Avoine d'automne	55	grain	88	19 (44)	23 (28)	6				
	70	paille	35	8 (19)	122 (147)	6				
	total		123	27 (63)	145 (175)	12	90	27 (63)	116 (140)	15
Avoine de printemps	55	grain	91	19 (44)	23 (28)	6				
	70	paille	29	8 (19)	122 (147)	6				
	total		120	27 (63)	145 (175)	12	90	27 (63)	145 (175)	15
Seigle d'automne	55	grain	72	19 (44)	23 (28)	6				
	70	paille	21	6 (14)	70 (84)	7				
	total		93	25 (58)	93 (112)	13	90	25 (58)	74 (89)	15

<sup>1</sup> Avec une teneur en eau moyenne à la récolte.

Tableau 9 (suite)

Culture	Rendement de référence <sup>1</sup> dt/ha	Produit	Prélèvement basé sur le rendement référence				Norme de fertilisation			
			N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg	N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg
			kg/ha				kg/ha			
Seigle d'automne hybride	65	grain	85	23 (52)	27 (33)	7				
	75	paille	23	7 (15)	75 (90)	8				
	total		108	30 (67)	102 (123)	15	90	30 (67)	82 (98)	15
Epeautre	45	grain	72	16 (36)	19 (23)	5				
	70	paille	35	8 (18)	70 (84)	7				
	total		107	24 (54)	89 (107)	12	100	24 (54)	71 (85)	15
Triticale d'automne	60	grain	96	19 (43)	24 (29)	5				
	75	paille	25	5 (11)	112 (135)	5				
	total		121	24 (54)	136 (164)	10	110	24 (54)	109 (132)	10
Triticale de printemps	55	grain	88	17 (40)	22 (27)	5				
	70	paille	23	4 (10)	105 (126)	4				
	total		111	21 (49)	127 (153)	9	100	21 (49)	127 (153)	10
Amidonner, engrain	25	grain	55	9 (20)	11 (13)	4				
	45	paille	18	6 (14)	34 (41)	3				
	total		73	15 (34)	45 (53)	7	30	15 (34)	36 (42)	10
Millet	35	grain	58	10 (23)	8 (10)	4				
	45	paille	75	11 (25)	85 (102)	11				
	total		133	21 (48)	93 (112)	15	70	22 (51)	95 (114)	12
Maïs-grain	100	grain	130	26 (59)	33 (40)	9				
	110	paille	80	12 (26)	160 (191)	14				
	total		210	38 (85)	193 (231)	23	110	46 (103)	195 (235)	25
Maïs d'ensilage	185 <sup>2</sup>	plante entière	218	38 (89)	200 (241)	24				
	total		218	38 (89)	200 (241)	24	110	46 (103)	195 (235)	25
Maïs vert	60 <sup>2</sup>	plante entière	114	17 (39)	134 (162)	6				
	total		114	17 (39)	134 (162)	6	70	17 (39)	134 (162)	10

<sup>1</sup> Avec une teneur en eau moyenne à la récolte.

<sup>2</sup> Rendement en matière sèche (MS).

Tableau 9 (suite)

Culture	Rendement de référence <sup>1</sup> dt/ha	Produit	Prélèvement basé sur le rendement référence				Norme de fertilisation			
			N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg	N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg
			kg/ha				kg/ha			
Pomme de terre de consommation et industrielle Groupe 1 <sup>a</sup> Groupe 2 <sup>b</sup> Groupe 3 <sup>c</sup>	450	tubercules	135	26 (59)	202 (243)	9				
	200	fanés	28	4 (10)	108 (130)	8				
	total		163	30 (69)	310 (373)	17	80 <sup>a</sup> 120 <sup>b</sup> 160 <sup>c</sup>	36 (82)	372 (448)	20
Pomme de terre primeur Groupe 1 <sup>a</sup> Groupe 2 <sup>b</sup> Groupe 3 <sup>c</sup>	300	tubercules	69	20 (45)	125 (150)	6				
	200	fanés	66	6 (14)	116 (140)	12				
	total		135	26 (59)	241 (290)	18	70 <sup>a</sup> 110 <sup>b</sup> 150 <sup>c</sup>	31 (71)	289 (348)	20
Pomme de terre plant Groupe 1 <sup>a</sup> Groupe 2 <sup>b</sup> Groupe 3 <sup>c</sup>	250	tubercules	58	17 (38)	104 (125)	5				
	200	fanés	66	6 (14)	116 (140)	12				
	total		124	23 (52)	220 (265)	17	60 <sup>a</sup> 100 <sup>b</sup> 140 <sup>c</sup>	28 (62)	264 (318)	20
Betterave sucrière	900	racines	108	24 (54)	149 (180)	27				
	475	feuilles et collets	157	17 (38)	248 (299)	43				
	total		265	41 (92)	397 (479)	70	100	40 (92)	318 (383)	70
Betterave fourragère	175 <sup>2</sup>	racines	193	38 (88)	261 (315)	23				
	400	feuilles	140	14 (32)	232 (280)	36				
	total		333	52 (120)	493 (595)	59	100	52 (120)	394 (476)	60
Colza d'automne	35	principal	102	22 (51)	25 (30)	8				
	90	secondaire	54	6 (14)	142 (171)	4				
	total		156	28 (64)	167 (201)	12	150	28 (69)	167 (202)	15
Colza de printemps	25	principal	65	16 (37)	17 (21)	7				
	45	secondaire	32	4 (9)	46 (56)	7				
	total		97	20 (46)	63 (77)	14	120	20 (46)	63 (77)	15

<sup>1</sup> Avec une teneur en eau moyenne à la récolte.

<sup>2</sup> Rendement en matière sèche (MS).

<sup>a,b,c</sup> Pour la pomme de terre, des corrections sont proposées en fonction des variétés pour assurer le rendement et la qualité de la récolte. Les variétés de pomme de terre de la liste recommandée (Schwaerzel *et al.* 2016) sont classées en trois groupes en fonction de leurs besoins en N (tableau 10). On observe des variations importantes de la réponse à la fertilisation N des variétés d'un site à un autre, principalement en fonction de la teneur en MO du sol à la plantation (Dupuis *et al.* 2009). Il est donc toujours recommandé d'ajuster la fertilisation N d'une variété non seulement en fonction de ses besoins propres mais aussi selon le N disponible dans le sol au moment de la plantation (Hebeisen *et al.* 2012; Dupuis *et al.* 2009; Sinaj *et al.* 2009; Reust *et al.* 2006).



Tableau 9 (suite)

Culture	Rendement de référence <sup>1</sup> dt/ha	Produit	Prélèvement basé sur le rendement référence				Norme de fertilisation			
			N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg	N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg
			kg/ha				kg/ha			
Tournesol	30	grain	95	14 (33)	21 (25)	9				
	60	paille	54	7 (16)	306 (369)	45				
	total		149	21 (49)	327 (394)	54	60	21 (49)	327 (394)	55
Chanvre oléagineux	13	grain	60	14 (33)	12 (14)	7				
	60	paille	54	10 (23)	70 (84)	9				
	total		114	24 (56)	82 (98)	16	60	24 (56)	82 (98)	20
Chanvre à fibre <sup>3</sup>	100	principal	30	13 (30)	75 (90)	5				
	40	secondaire	110	26 (60)	91 (110)	20				
	total		140	39 (90)	166 (200)	25	100	39 (90)	166 (200)	25
Lin oléagineux	20	grain	109	10 (24)	16 (19)	1				
	25	paille	15	6 (13)	37 (45)	2				
	total		124	16 (37)	53 (64)	3	80	16 (37)	53 (64)	5
Lin fibre	45	grain	45	14 (32)	75 (90)	9				
	15	fibres	82	8 (18)	12 (14)	1				
	total		127	22 (50)	87 (104)	10	60	22 (50)	87 (104)	10
Roseau de Chine	200 <sup>2</sup>	plante entière	42	9 (20)	93 (112)	6				
	total		42	9 (20)	93 (112)	6	30	9 (20)	93 (112)	10
Kénaïf	50 <sup>2</sup>	plante entière	100	26 (60)	66 (80)	10				
	total		100	26 (60)	66 (80)	10	70	26 (60)	66 (80)	10
Pois protéagineux	40	grain	140	17 (39)	40 (48)	5				
	50	paille	100	17 (39)	66 (80)	11				
	total		240	34 (78)	106 (128)	16	0	34 (78)	127 (154)	20
Féverole	40	grain	160	24 (56)	46 (56)	10				
	45	paille	135	7 (16)	75 (90)	15				
	total		295	31 (72)	121 (146)	25	0	31 (72)	145 (175)	25

<sup>1</sup> Avec une teneur en eau moyenne à la récolte.<sup>2</sup> Rendement en matière sèche (MS).<sup>3</sup> Selon le moment et la technique, on récolte la plante entière ou seulement la tige.

Tableau 9 (suite)

Culture	Rendement de référence <sup>1</sup> dt/ha	Produit	Prélèvement basé sur le rendement référence				Norme de fertilisation			
			N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg	N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg
			kg/ha				kg/ha			
Soja	30	grain	180	15 (35)	48 (58)	6				
	30	paille	105	15 (35)	53 (64)	9				
	total		285	30 (70)	101 (122)	15	0	30 (71)	121 (147)	15
Lupin doux	30	grain	165	13 (30)	34 (41)	6				
	30	paille	105	5 (12)	50 (60)	12				
	total		270	18 (42)	84 (101)	18	0	18 (42)	101 (121)	20
Engrais vert (légumineuse)	35 <sup>2</sup>	plante entière	153	16 (37)	102 (123)	9				
	total		153	16 (37)	102 (123)	9	0	0 (0)	0 (0)	0
Engrais vert (non-légumineuse)	35 <sup>2</sup>	plante entière	85	14 (32)	143 (173)	8				
	total		85	14 (32)	143 (173)	8	0	0 (0)	0 (0)	0
Cultures dérobées (par utilisation)	25 <sup>2</sup>	plante entière	70	10 (24)	75 (90)	6				
	total		70	10 (24)	75 (90)	6	30	10 (24)	55 (67)	10
Tabac Burley	25 <sup>2</sup>	feuille	75	8 (18)	104 (125)	7				
	30 <sup>2</sup>	troncs	69	10 (22)	112 (135)	6				
	total		144	18 (40)	216 (260)	13	170	18 (40)	216 (260)	15
Tabac Virginie	25 <sup>2</sup>	feuille	63	6 (14)	99 (119)	5				
	25 <sup>2</sup>	troncs	25	9 (21)	104 (125)	10				
	total		88	15 (35)	203 (244)	15	30	15 (35)	203 (244)	15
Riz	60	grain	66	18 (41)	27 (32)	5				
	60	paille	39	8 (18)	102 (123)	11				
	total		105	26 (60)	129 (155)	16	110	26 (60)	120 (145)	10

<sup>1</sup> Avec une teneur en eau moyenne à la récolte.

<sup>2</sup> Rendement en matière sèche (MS).

Tableau 10. Correction de la norme de fertilisation N en fonction de la variété de pomme de terre.

Groupe	Variétés	Correction de la norme
Groupe 1 (variétés peu exigeantes)	Agria, Fontane, Jelly et Nicola	norme – 40 kg N/ha
Groupe 2 (variétés moyennement exigeantes)	Agata*, Annabelle*, Amandine*, Bintje, Celtiane*, Challenger, Désirée*, Ditta*, Erika*, Gourmandine, Gwenne*, Hermes*, Lady Christl, Laura, Markies, Panda, Piroli*, Venezia*, Verdi	norme
Groupe 3 (variétés très exigeantes)	Charlotte, Innovator, Lady Claire, Lady Rosetta et Victoria	norme + 40 kg N/ha

Les variétés marquées d'une étoile sont classées par défaut dans le groupe 2, mais les expérimentations se poursuivent pour préciser leurs besoins en N.

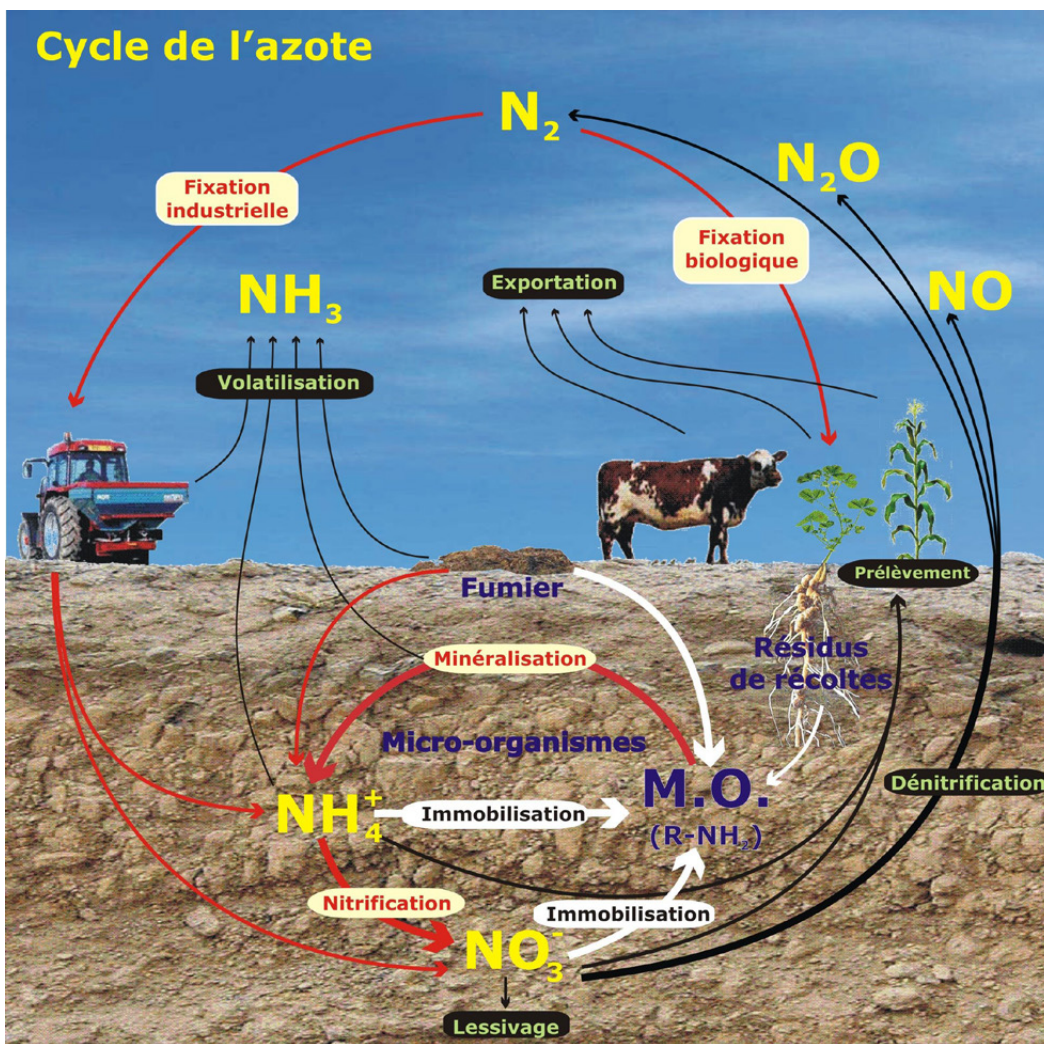
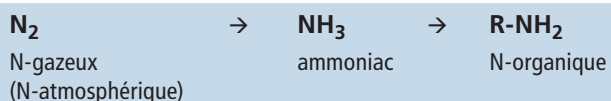


Figure 6. Cycle de l'azote à l'échelle parcellaire.

### 3.1.1 Cycle de l'azote

L'azote est un élément essentiel pour la croissance des cultures. Sur une parcelle, les apports de N peuvent s'effectuer par un épandage d'engrais minéraux de synthèse, par recyclage de résidus de récolte et d'engrais de ferme ou par fixation biologique du N<sub>2</sub> atmosphérique via les légumineuses. Dans le cycle du N (figure 6), les processus de fixation, minéralisation et nitrification augmentent le N disponible dans le sol alors que la dénitrification, la volatilisation, l'immobilisation, le lessivage et le prélèvement par les plantes provoquent une diminution du N dans la zone du système racinaire.

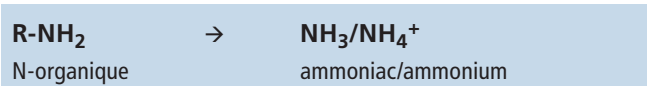
La **fixation** est le processus de conversion du N atmosphérique en une forme disponible pour les plantes.



La fixation peut être soit industrielle (production des engrais commerciaux), soit biologique (par les bactéries des nodosités racinaires des légumineuses). La fixation du N demande de l'énergie, des enzymes et des minéraux. Par conséquent, si du N disponible se trouve dans le sol, la

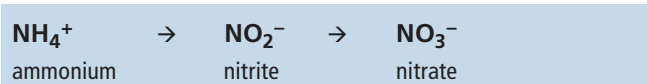
plante utilisera plutôt cette forme au lieu de fixer le N de l'air.

La **minéralisation** est le processus par lequel les microorganismes décomposent le N organique (engrais de ferme, résidus de cultures, matière organique du sol) en ammoniac (NH<sub>3</sub>).



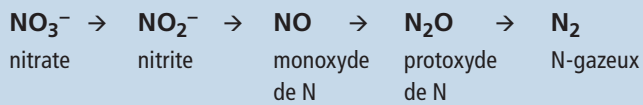
L'intensité de la minéralisation dépend de la teneur et de la qualité de la MO du sol, du précédent cultural, de l'arrière-effet des engrais organiques (engrais de ferme, résidus de récolte, engrais verts), du climat (température, humidité) et de la présence d'oxygène dans le sol (aération)

La **nitrification** est le processus par lequel les microorganismes (*nitrosomonas* et *nitrobacter*) convertissent l'ammonium en nitrite puis en nitrate pour obtenir de l'énergie.



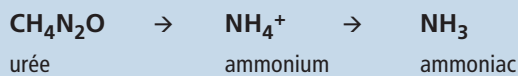
Le nitrate est la forme la plus disponible du N du sol mais elle est très sensible aux pertes par lessivage.

La **dénitrification** est le résultat de la conversion des nitrates en une forme gazeuse du N, tel que le monoxyde de N, le protoxyde de N et le gaz azoté.



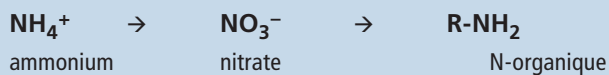
Comme la dénitrification survient en absence d'oxygène, les émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  sont plus importantes dans les sols lourds, compactés et mal drainés, ou dans des zones d'accumulation d'eau.

La **volatilisation** de l'ammoniac dans l'air est un processus qui survient principalement dans les heures qui suivent l'application en surface d'un engrais ammoniacal.



Ce phénomène touche particulièrement les fumiers et lisiers qui contiennent beaucoup de  $\text{NH}_4^+$ , ce qui peut réduire fortement leur efficacité fertilisante. Une incorporation, même superficielle, le jour de l'application du fumier, du lisier ou du purin est le meilleur moyen pour limiter la volatilisation. Les conditions atmosphériques et l'équipement utilisé ont également une grande influence.

L'**immobilisation** est le processus inverse de la minéralisation.



L'immobilisation se réfère au prélèvement des nitrates et de l'ammonium par les microorganismes du sol, avec pour conséquence la réduction de leur disponibilité pour les plantes.

Le **lessivage** des nitrates se produit quand les sols reçoivent plus d'eau que ce qu'ils peuvent retenir. L'eau en surplus s'infiltre dans le sol et entraîne avec elle les nitrates qui atteignent le système de drainage souterrain, puis la nappe phréatique ou le cours d'eau. Ce phénomène est plus marqué dans les sols à texture légère et peu profonds. La profondeur à laquelle les nitrates descendent dépend de la quantité d'eau qui s'infiltre dans le sol, de l'état d'humidité du sol avant la pluie et du type de sol. Les fertilisants N sous forme de nitrates sont sujets à ces pertes dès leur application. Un peu d'ammonium peut aussi être lessivé dans les sols sableux.

Le **prélèvement par les plantes** est le premier objectif de la gestion de la fertilisation N (minérale et organique). Pour augmenter l'efficacité d'utilisation du N et par conséquent réduire les pertes dans l'environnement et les pertes économiques qui en découlent, l'agriculteur doit optimiser surtout trois aspects: (i) la dose de l'apport (plusieurs études ont démontré qu'au-delà du niveau de fertilisation optimale, le coefficient d'utilisation du N par différentes cultures diminue beaucoup et le risque de

pertes dans l'environnement s'accroît considérablement), (ii) le moment d'application (tableau 26), (iii) les conditions de sol (la plupart des processus de transformation du N dépendent de l'activité biologique du sol. Les conditions climatiques et les propriétés physico-chimiques du sol jouent un rôle très important. L'efficacité de la fertilisation N sera meilleure si le sol a une bonne structure et s'il est bien drainé).

### 3.1.2 Méthodes pour calculer la dose d'engrais azoté

Deux méthodes sont utilisées en Suisse pour calculer la dose d'engrais N: (i) la méthode des normes corrigées, également appelée méthode par estimation, (ii) la méthode  $N_{min}$ . Une étude récente (Maltas *et al.* 2015) a montré que les deux méthodes ont la même performance et qu'elles conduisent toutes deux à recommander des doses d'engrais N proches de la dose optimale.

#### 3.1.2.1 Méthode des normes corrigées

La méthode des normes corrigées estime la dose de N à apporter en corrigeant une dose de référence en fonction des conditions pédoclimatiques et culturales du site. Cette dose de référence, appelée aussi norme de fertilisation, correspond, pour une culture donnée, à la quantité de N qu'il faut apporter dans une situation standard (sol normalement pourvu en N) pour obtenir le rendement moyen ou rendement de référence observé en Suisse pour cette culture (tableau 9). Les normes de fertilisation et les rendements de référence sont issus d'expérimentations ayant permis d'établir la courbe de réponse des cultures à la fertilisation N, de l'expérience des agriculteurs et du savoir d'experts.

Dès que la situation pédoclimatique diffère de la situation standard, des facteurs de correction sont appliqués à la norme de fertilisation. Sept facteurs de correction, qui peuvent prendre des valeurs négatives ou positives, sont ainsi pris en compte (Eq. 1). Le facteur rendement (**fRdt**) prédit la demande en N pour un rendement cible supérieur ou inférieur au rendement de référence (tableau 11; Richner *et al.* 2010). Cinq autres facteurs permettent d'estimer l'impact des conditions pédoclimatiques de la parcelle sur l'offre en N du sol. En considérant que ces facteurs s'additionnent et n'interagissent pas, la dose de N à apporter (**X**) se résume à l'équation suivante :

$$X = \text{Norme} + (fRdt + fMos + fPc + fMa + fPluie + fTs + fPr) \quad \text{Eq.1}$$

**fMos** prend en compte l'effet de la teneur en argile et en MO du sol sur la minéralisation de la MO (tableau 12), **fPc** tient compte de l'effet du type de précédent cultural et de sa date d'enfouissement sur la minéralisation des résidus de culture (tableau 13), **fMa** calcule la proportion du N total contenu dans les engrais organiques disponible l'année suivant celle de l'apport (tableau 14), **fPluie** estime l'impact des pluies sur les pertes de N par lixiviation pendant l'hiver et le printemps (tableau 15) et **fTs** simule l'effet positif de sarclages répétés sur la minéralisation de la MO (tableau 16).

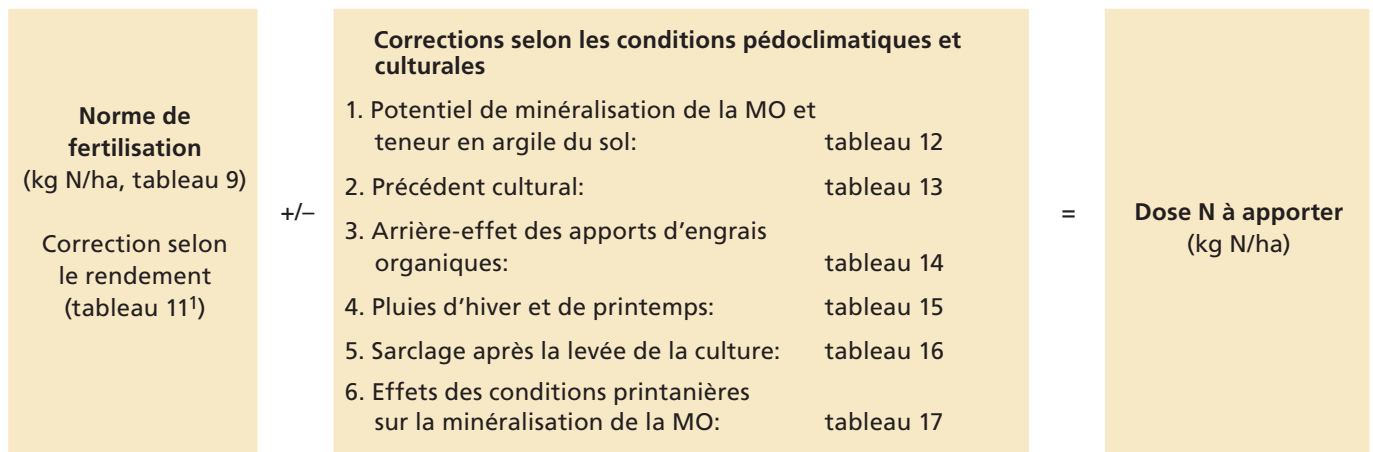


Figure 7. Présentation schématique de la méthode des normes corrigées. <sup>1</sup> La norme de fertilisation est corrigée en fonction du rendement uniquement pour les cultures figurant dans le tableau 11.

Pour les cultures sarclées de printemps (maïs, betterave, tournesol, pomme de terre, etc.), la période entre la sortie de l'hiver et le semis, période sans absorption de N par les cultures mais avec une bonne minéralisation de la MO, est relativement étendue. Si la pluviométrie et la température durant cette période sont favorables à la minéralisation, les stocks de N minéral au semis peuvent être très élevés (Maltas *et al.* 2015). Le tableau 17 tient compte de cette

situation et représente un nouveau facteur de correction (*fPr*) qui intègre les effets des conditions printanières (humidité et température) sur la minéralisation de la MO et la disponibilité de N.

Le principe d'utilisation de la méthode des normes corrigées pour optimiser la fertilisation N dans les grandes cultures est présenté schématiquement à la figure 7.

Tableau 11. Correction de la fertilisation N lorsque le rendement cible diffère du rendement moyen de référence.

Culture	Correction de la fertilisation N en fonction du rendement (kg N/ dt grain en plus)	Rendement cible maximal (dt grain/ha)
Blé panifiable d'automne	1,0	80
Blé fourrager d'automne	1,0	95
Orge d'automne	0,7	90
Seigle d'automne	0,8	80
Seigle hybride d'automne	1,2	90
Triticale d'automne	0,3	95
Colza d'automne	3,0	45

Exemple: pour un rendement attendu de 75 dt/ha de blé panifiable d'automne, soit 15 dt/ha supérieur au rendement moyen de référence, ajouter 15 kg/ha N à la norme de fertilisation).



Terres agricoles plus ou moins riches en matière organique (photo: Agroscope).

Tableau 12. Correction de la fertilisation N en fonction du potentiel de minéralisation de la matière organique (MO).

Potentiel de minéralisation de la MO	MO (%)			Corrections par rapport à la norme (kg N/ha)
	Argile <15 %	Argile 15–30 %	Argile >30 %	
Faible à moyen	< 1,2	< 1,8	< 2,5	0 à +40
Moyen	1,2–2,9	1,8–3,9	2,5–5,9	0
Moyen à élevé	3,0–6,9	4,0–7,9	6,0–9,9	0 à –40
Élevé à très élevé	7,0–19,9	8,0–19,9	10,0–19,9	–40 à –80
Très élevé	≥ 20,0	≥ 20,0	≥ 20,0	–80 à –120

**Tableau 13. Correction de la fertilisation N en fonction du précédent cultural.**

Précédent cultural	Correction pour la culture à mettre en place (kg N/ha)	
	labour/enfouissement	
	automne	printemps
Prairie naturelle ou temporaire (3 ans et plus)	-30	-40
Prairie temporaire (2 ans)	-20	-30
Prairie temporaire de 1 an	-10	-20
Prairie naturelle ou temporaire (3 ans et plus) comme anté-précédent <sup>1</sup>	-10	-10
Prairie temporaire broyée avant épiaison des graminées		-30 à -60 <sup>2</sup>
Prairie temporaire broyée avant floraison des graminées		-20 à -40 <sup>2</sup>
Céréale ou maïs (paille enfouie) suivie:		
- d'une culture d'automne	+20	
- d'une culture de printemps en février-mars	+10	
Légumineuse à graines (pois, féverole, soja et lupin) suivies:		
- d'une culture d'automne précoce	40 à 60	
- d'une culture d'automne tardive	20 à 40	
- d'une culture de printemps	0 à 20	
Betterave (feuilles enfouies)	-20	
Engrais vert non hivernant (phacélie, moutarde jaune, etc.)	-10	0
Engrais vert non hivernant à base de légumineuses	-20	-10
Engrais vert hivernant (colza, navette, etc.)	0	-20
Engrais vert hivernant à base de légumineuses	0	-30
Chanvre fibre	-10	
Pomme de terre	-10	
Autres précédents <sup>3</sup>	0	

<sup>1</sup> Cette correction peut être cumulée avec une autre correction de ce tableau.

<sup>2</sup> Valeur basse: peu de légumineuses; valeur élevée: beaucoup de légumineuses.

<sup>3</sup> Céréales (paille récoltée), maïs ensilage, colza, tournesol, soja, tabac, cultures dérochées, etc.

**Tableau 14. Correction de la fertilisation N en fonction des arrière-effets des apports d'engrais organiques.**

L'efficacité du N des engrais de ferme, l'année de leur application, est donnée dans le tableau 7 du module 4.

Engrais organique	Proportion (%) de N-total utilisable l'année suivant celle de l'apport, à déduire de la norme de fertilisation
Lisier et purin (bovins)	10
Fumier au tas et fumier de stabulation libre	10
Fumier composté	15
Compost de fumier	20
Fumier de cheval	5
Fumier de moutons ou de chèvres	10
Lisier et fumier de porcs	10
Crottes de poules (tapis roulant pour fientes)	10
Fumier de poules (au sol)	10
Fumier de volailles (à l'engrais) poulet, dinde	5
Compost	0
Chaux d'Aarberg	10

Tableau 15. Correction de la fertilisation N en fonction des pluies d'hiver et de printemps.

Culture	Corrections de la fertilisation N (kg N/ha)			
	Période de précipitations et intensité			
	Repos hivernal (novembre–janvier)		Reprise de la végétation et semis (mars–mai)	
	faible (< 60 mm/mois)	forte (> 90 mm/mois)	faible (< 60 mm/mois)	forte (> 90 mm/mois)
Colza d'automne	-10	+10	0	0
Céréales d'automne	-20	+20	0	0
Céréales de printemps	-20	0	-10	+10
Pommes de terre primeur	-20	+10	-10	+30
Betteraves, maïs, pommes de terre (plant, consommation et industrielle).	0	+10	-10	+30

Tableau 16. Libération de N complémentaire suite à des sarclages répétés après la levée de la culture, selon le taux de matière organique du sol.

Teneur en MO (%)	Correction de la fertilisation N (kg N/ha)
< 8	-10
8–20	-15
> 20	-20

Pour un seul sarclage de la betterave, de la pomme de terre et du maïs, il n'y a pas lieu d'utiliser ces corrections car la majorité des essais effectués ont été réalisés sur des cultures ayant subi un sarclage.

### 3.1.2.2 Méthode $N_{\min}$

La seconde méthode pour calculer la dose de N à apporter est la méthode fondée sur la mesure du N minéral dans le sol (méthode  $N_{\min}$ ). Cette méthode se base sur une valeur de référence (seuil) à laquelle on soustrait la mesure  $N_{\min}$ , mesure qui donne le stock de N minéral présent dans le sol à un moment donné (avant le premier apport de N). Cette valeur de référence est plus élevée que la norme de fertilisation car elle intègre la mesure  $N_{\min}$ . Elle a été établie suite à de nombreux essais au champ qui ont permis de mettre en relation les mesures  $N_{\min}$  et les doses de N optimales (Neeteson 1990). Par rapport à la méthode des normes corrigées, cette approche a l'avantage de mesurer directement le  $N_{\min}$  dans le sol et d'éviter de devoir l'estimer sur la base de tables de référence. La période et la profondeur de prélèvement du  $N_{\min}$  dépendent de la culture (tableau 18).

La mesure  $N_{\min}$  intègre les caractéristiques spécifiques de la parcelle et du climat car les effets des différents facteurs évoqués dans la méthode des normes corrigées sont directement contenus dans cette mesure. Si cette méthode simplifie le calcul de la dose de N optimale, elle ne tient pas compte de l'effet de ces facteurs après la date de mesure du  $N_{\min}$ . Pour pallier à cela, des facteurs de correction sont appliqués, comme pour la méthode des normes corrigées. Le nombre de ces facteurs est limité et seuls des facteurs de corrections négatifs sont pris en compte (tableaux 19 et 20). Pour le colza, l'ajout d'un nouveau facteur de correction prenant en compte l'état du colza au moment du

Tableau 17. Correction de la fertilisation N en fonction des conditions météorologiques (humidité et température) printanières et de l'état du sol.

Conditions printanières	Correction de la fertilisation N (kg N/ha)
Printemps chaud avec un sol normalement pourvu en eau et présentant un bon état structural	-20
Conditions moyennes	0
Printemps froid avec un sol très humide ou très sec et une structure défavorable	+20

prélèvement  $N_{\min}$  pourrait améliorer les résultats (chapitre 3.1.3).

La détermination de  $N_{\min}$  tient compte aussi bien du N nitrrique ( $N\text{-NO}_3$ ) que du N ammoniacal ( $N\text{-NH}_4$ ) disponibles dans les différentes couches du sol. Pour une mise en œuvre sûre de la méthode  $N_{\min}$ , une attention particulière doit être portée sur plusieurs points. Le moment et la profondeur du prélèvement doivent être respectés (tableau 18). Compte tenu des variations possibles dans les caractéristiques du sol, il faut au moins 10 à 12 piqûres par parcelle pour que l'échantillon soit représentatif. La proportion de pierres dans les échantillons doit être évaluée objectivement. Les échantillons doivent être acheminés rapidement au laboratoire, bien protégés de tout réchauffement dans une caisse réfrigérée ou congelés. Les résultats sont exprimés en kg  $N\text{-NO}_3$  et kg  $N\text{-NH}_4$ /ha. Le dosage du  $N_{\min}$  du sol par des tests rapides, même confirmés, n'est pas recommandé à cause de l'imprécision de ces tests.

### 3.1.3 Autres outils de pilotage de la fertilisation azotée

#### 3.1.3.1 Méthode du bilan prévisionnel

La méthode du bilan prévisionnel consiste à équilibrer les besoins en N de la culture par les fournitures du sol et des engrais (COMIFER 2013). Ceci implique l'évaluation précise de la demande en N de la culture pour un rendement donné ainsi que l'estimation de la fourniture de N par le sol durant la période de croissance. Le  $N_{\min}$  du sol peut être mesuré ou estimé, selon l'approche et les moyens. La

méthode du bilan paraît intéressante car elle permet de tenir compte de la diversité des situations pouvant se présenter dans la pratique et peut même être utilisée en cours de saison pour les apports fractionnés (Schvartz *et al.* 2005). Cette méthode est toutefois peu utilisée car elle est à mi-chemin entre simplicité (utilisation de tables de référence ou méthode  $N_{\min}$ ) et complexité (utilisation d'un modèle de simulation) (Burns 2006). L'établissement d'un bilan est confronté à deux problématiques (i) la quantification précise du N fourni par le sol et (ii) l'estimation des besoins calculés en fonction d'un objectif de rendement établi a priori et qui peut varier au cours de la période de

végétation. Un modèle dynamique permettant des ajustements en cours de saison serait ainsi beaucoup plus précis et adapté.

Actuellement et pour les conditions suisses, seule la betterave sucrière bénéficie de ce type d'outil. Un outil sur internet permet de dresser un bilan prévisionnel basé sur des recommandations et des valeurs individuelles relativement détaillées. L'accès à cet outil se trouve sur le site du Centre betteravier suisse (<http://www.liz-online.de/CH/npro/frz/Npro-CH-frz.htm>).

**Tableau 18. Stade et profondeur de prélèvement des échantillons pour la détermination du  $N_{\min}$ .**

Cultures	Stade de prélèvement	Profondeur de prélèvement (cm) <sup>1</sup>
Céréales d'automne, colza	Peu avant la reprise de la végétation	0–30, 30–60, 60–90
Céréales de printemps	Du semis au stade 3 feuilles	0–30, 30–60, 60–90
Betterave <sup>2</sup>	Stade 4–6 feuilles	0–30, 30–60, 60–90
Maïs <sup>2</sup>	Stade 5–6 feuilles (ne compter que les feuilles complètement développées)	0–30, 30–60, 60–90
Pomme de terre	Peu avant la plantation	0–30, 30–60

<sup>1</sup> Dans la pratique, les prélèvements sont souvent limités à 60 cm de profondeur. Dans de tels cas, les valeurs de référence pour le calcul de la fertilisation N doivent être adaptées en conséquence. La documentation idoine est disponible auprès du laboratoire d'analyse ou auprès du service de vulgarisation.

<sup>2</sup> La méthode  $N_{\min}$  fournit des résultats fiables pour autant que la fertilisation N au semis ou à la plantation de la culture ne dépasse pas 40 kg N/ha.

**Tableau 19. Fertilisation N des céréales basée sur la teneur en  $N_{\min}$  du sol.**

Culture	1 <sup>er</sup> apport	2 <sup>e</sup> apport <sup>1</sup>	3 <sup>e</sup> apport <sup>1, 2</sup>
	kg N/ha		
Blé d'automne	120 moins $N_{\min}$	30	40
Blé de printemps, épeautre	110 moins $N_{\min}$	30	40
Orge d'automne	80 moins $N_{\min}$	30	40
Triticale d'automne	90 moins $N_{\min}$	30	40
Orge et triticale de printemps, seigle d'automne	80 moins $N_{\min}$	30	30
Avoine	100 moins $N_{\min}$	30	30

Ces recommandations ne sont valables que si certaines conditions sont remplies:

- Potentiel de rendement du site correspondant aux valeurs du tableau 9 ou supérieur.
- Risque de verse minimal (éventuellement utilisation d'un régulateur de croissance).
- Faible risque de pertes de rendement dues à des maladies ou des ravageurs (choix variétal, technique culturale, rotation des cultures, recours éventuel à des fongicides ou des insecticides).
- Sol avec une teneur en matière organique inférieure à 5 % et avec une profondeur utile supérieure à 70 cm.

**Pour les cas particuliers ci-après, des déductions doivent être appliquées (ces déductions ne sont pas cumulables; la déduction maximale par apport est de 30 kg N/ha)**

Motif de correction	1 <sup>er</sup> apport	2 <sup>e</sup> apport	3 <sup>e</sup> apport
	kg N/ha		
Prairie temporaire de plusieurs années ou prairie permanente comme précédent cultural	-20	-10	-20
Sol avec 5 à 20 % de matière organique	-10	-20	-20
Profondeur utile du sol inférieure à 70 cm ou potentiel de production du site faible à moyen (zone marginale pour les grandes cultures)	-10	-10	-20
Aucune utilisation de régulateur de croissance	-10 <sup>a</sup> à -20 <sup>b</sup>	-10	0

Les indications concernant le fractionnement de la fertilisation N ainsi que les quantités maximales par apport figurent dans le tableau 26.

<sup>1</sup> Selon les conditions particulières de croissance et de développement des cultures, ces doses de N peuvent être majorées ou réduites de 10 kg/ha.

<sup>2</sup> En cas de forte attaque de maladies, il faut renoncer au 3<sup>e</sup> apport.

<sup>a</sup> Orge, triticale, seigle.

<sup>b</sup> Blé, épeautre avoine.



**Tableau 20. Fertilisation N des cultures sarclées basée sur les teneurs en  $N_{\min}$  du sol (prélèvements de 0 à 90 cm).**

Culture	1 <sup>er</sup> apport (kg N/ha)	2 <sup>e</sup> apport <sup>1</sup> (kg N/ha)
Maïs	0–30	$N_{\min} > 120$ : 200 moins $N_{\min}$ $N_{\min} < 120$ : 180 moins $N_{\min}$
Betterave sucrière ou fourragère	0–30	180 moins $N_{\min}$
Pommes de terre de consommation ou industrielles	200 moins $N_{\min}$ (à la plantation)	
Pommes de terre primeurs ou plants	180 moins $N_{\min}$ (à la plantation)	
Colza d'automne	0–40 (au semis)	160 moins $N_{\min}$
Corrections liées à une teneur en matière organique élevée ou à un faible potentiel de rendement du site:		
Teneur du sol en matière organique de 5–20 %	0 à –30	–20 à –40
Potentiel de rendement du site faible à moyen	0	–20 à –40
Il n'y a pas de correction à apporter en relation avec l'arrière-effet de cultures dérobées, de couverts végétaux ou d'engrais de ferme. Cet arrière-effet est en grande partie compris dans le $N_{\min}$ mesuré dans le sol.		

Les indications concernant le fractionnement de la fertilisation N ainsi que les quantités maximales par apport figurent dans le tableau 26. Le 1<sup>er</sup> apport de N est appliqué en général au semis ou à la plantation; il peut toutefois être supprimé si le précédent cultural apporte beaucoup de N ou si le potentiel de minéralisation du sol est particulièrement élevé. Le 2<sup>e</sup> apport est effectué aussitôt après avoir obtenu le résultat de l'analyse  $N_{\min}$  (pour le moment du prélèvement, voir tableau 18).

<sup>1</sup> Un fractionnement en 2 apports est recommandé, en particulier sur les sols dont la profondeur utile est inférieure à 70 cm ainsi que dans les régions aux précipitations abondantes (plus de 260 mm durant la période d'avril à juin). Selon les conditions météorologiques et les conditions de croissance, l'intervalle entre les apports est de 2 à 4 semaines.

### 3.1.3.2 Modèles de simulation

Les modèles dynamiques de simulation évaluent l'effet de la météo, du sol et des pratiques culturales et les interactions entre ces trois variables sur la production des cultures et sur l'environnement. Ces modèles peuvent automatiquement prendre en considération l'évolution des interactions entre le sol et la plante sur l'offre et la demande en N pendant la croissance. Les recommandations peuvent également être adaptées aux conditions pédoclimatiques spécifiques de la parcelle puisque les données considérées par ces modèles incluent habituellement le type de sol, les pratiques culturales et les conditions climatiques. Les modèles de simulation ont un grand potentiel. Cependant, à cause des incertitudes sur les paramètres considérés et sur les systèmes d'équations, les recommandations issues de ces modèles dynamiques sont souvent imprécises (Naud *et al.* 2008). La mise au point de plusieurs modèles en Europe témoigne de l'intérêt grandissant pour les modèles dynamiques de simulation. Le logiciel français Azofert® (Machet *et al.* 2003) est un de ces modèles de simulation prometteur. Basé sur un bilan du  $N_{\min}$  complet, il intègre la dynamique des fournitures de N et de la croissance de la plante. La conception informatique permet au logiciel de s'adapter à divers contextes pédoclimatiques et systèmes de cultures propres aux utilisateurs. L'évaluation de la performance de ce logiciel dans les conditions suisses, avec une version d'AzoFert® utilisée dans le Nord de la France, a montré qu'il permet une prédiction satisfaisante de la dose optimale, au moins équivalente à celle obtenue avec les méthodes des normes corrigées ou du  $N_{\min}$ . Dans un contexte suisse différent, particulièrement sur le plan climatique et agro-pédologique, il n'est pas surprenant que les performances de cet outil ne se soient pas exprimées à leur niveau potentiel (Maltas *et al.* 2015).

### 3.1.3.3 Outils d'aide à la décision

Malgré tous les efforts pour estimer de façon précise les fournitures de N par le sol, un bilan ou une norme prévisionnelle demeure «prévisionnel». Des outils complémentaires permettent d'ajuster en cours de végétation les variations dues aux aléas climatiques et autres. Selon Schwartz *et al.* (2005), des essais au champ montrent que la mise en œuvre des méthodes telles que JUBIL®, Hydro N-Tester, Héliotest et Double-densité permet d'améliorer la fiabilité du bilan prévisionnel du N utilisé en France. Ces outils complémentaires sont toutefois spécifiques à certaines cultures et ne peuvent pas être généralisés à l'ensemble des grandes cultures.



N-Tester (photo: Agroscope).

**Témoign azote.** Des fenêtres de fertilisation (surfaces délimitées d'environ un are) recevant un apport en N réduit (-40 kg N/ha), voire même nul, peuvent rendre de précieux services comme aide à la décision ou comme instrument de contrôle d'efficacité de la fertilisation N. Il faut prévoir une nouvelle fenêtre pour chaque apport de N. En culture céréalière, la comparaison de l'état de la végétation entre la fenêtre et le reste du champ permet d'optimiser le prochain apport de N. Un concept légèrement différent a été adapté à la culture du tournesol. Dans l'Héliotest (Terres Inovia), la comparaison visuelle d'une bande de la parcelle fertilisée au semis avec le reste de la parcelle non fertilisée au semis est le critère de décision. Entre les stades «6 feuilles» et «14 feuilles», on observe toute différence (couleur, hauteur, volume de végétation) entre les plantes fertilisées au semis et le reste du champ. Le stade auquel apparaît une différence permet d'évaluer l'éventuel complément de fertilisation N nécessaire. Plus la différence visuelle apparaît tôt, plus la carence en N sera intense. A partir des fournitures du sol et des besoins de la culture (à maturité, 4,5 kg de N sont absorbés dans la plante entière par dt de grains produits), il est possible d'utiliser la méthode des normes corrigées pour calculer la dose de N à apporter en fonction du stade d'apparition de la différence visuelle et de l'objectif de rendement (Pellet et Grosjean 2007).

**Double densité.** Cette méthode pratiquée dans les céréales se base sur l'apparition d'une carence dans un témoin «double densité». Au moment du semis de la céréale, on définit une placette sur laquelle on double la densité de semis. On peut admettre que la double densité va prélever plus de N que la densité simple. Ainsi, le N disponible dans le sol sera épuisé plus rapidement. Les premiers symptômes de carence vont donc précéder ceux de la densité simple et se traduire par un jaunissement plus prononcé. Le 1<sup>er</sup> apport sera réalisé à partir de cette date. Pour décider du 2<sup>e</sup> apport, on attend que la placette «double densité» fertilisée au 1<sup>er</sup> apport avec la même dose que la densité simple accuse à nouveau un jaunissement par rapport à la densité simple (Limaux *et al.* 1999).

**Analyse de sucs de plante.** Cette méthode mesure par le biais de tests rapides (Test Nitrates, Jubil® ou autres) la teneur en nitrates dans le suc de la plante. Pour les céréales, des prélèvements à la base du maître brin sont effectués à une période précise. Grâce à un étalonnage de référence spécifique à chaque variété, ces résultats peuvent apporter une précieuse aide à la décision pour déterminer la dose de N (Pellet 2000a et b).

**Mesures de la chlorophylle.** La mesure de la chlorophylle (Méthode N-Tester, Yara 2008) est un test rapide qui mesure la coloration du feuillage et qui renseigne sur l'état de

nutrition des plantes. Un étalonnage spécifique pour chaque variété est nécessaire. La couleur des feuilles est aussi influencée par d'autres facteurs que le niveau d'alimentation en N (par ex. approvisionnement en S) et peut rendre l'interprétation de l'analyse délicate.

**Farmstar.** Conçu par Astrium (Airbus Defence & Space) et ARVALIS-Institut du végétal (France), Farmstar est un autre outil plus récent qui fait appel à l'imagerie satellitaire. Il cherche aussi à évaluer la teneur en chlorophylle du couvert, associée à un indice de surface du couvert (LAI), en s'appuyant sur des mesures réalisées par des capteurs embarqués par des satellites. Très précises et surtout spatialisées, les données recueillies alimentent des modèles et fournissent deux variables agronomiques (i) la biomasse et (ii) le statut en N du couvert. Pour le pilotage de la fertilisation N, le diagnostic est réalisé en début de montaison (avril) et le conseil est délivré sous la forme d'une carte de chaque parcelle présentant la variabilité intra-parcellaire de la dose recommandée et d'une dose moyenne pour toute la parcelle destinée aux agriculteurs ne pouvant pas moduler leurs épandages.

**Réglette Azote (Terres Inovia).** Cette méthode permet de calculer la dose de N à apporter au colza au printemps, en prenant en compte le N déjà absorbé en automne, via une pesée des parties aériennes en sortie d'hiver. Cette méthode permet de réduire sensiblement la fertilisation N des cultures de colza qui se sont fortement développées avant l'hiver, sans pénaliser le rendement final. Elle est disponible gratuitement sur internet ([regletteazotecolza.fr](http://regletteazotecolza.fr)). Une calibration en fonction des sols et climats suisses est nécessaire pour pouvoir généraliser son utilisation (Miche-neau *et al.* 2016).

### 3.2 Fertilisation phosphatée, potassique et magnésienne

Contrairement au N, la fertilisation des grandes cultures en P, K et Mg est basée sur deux critères importants: (i) le prélèvement de la culture et (ii) le résultat des analyses de sol. On tient également compte de la capacité d'absorption des cultures et des résidus de récolte de l'année précédente (figure 8).

#### 3.2.1 Etablissement de la norme de fertilisation

La base du raisonnement de la fertilisation P, K et Mg est le besoin de la culture, soit son prélèvement en P, K et Mg (tableau 9). Celui-ci est défini par un objectif de rendement (rendement de référence) et la concentration en éléments nutritifs des produits végétaux récoltés (annexe 1). Afin de prendre en considération l'amélioration génétique

#### Prélèvement

$$\text{Rendement de référence} \times \text{Concentration dans la plante} \times \text{Correction culture} = \text{Norme de fertilisation}$$

$$(\text{Norme de fertilisation} \times \text{Correction sol}) - \text{Résidus année précédente} = \text{Norme corrigée}$$

Figure 8. Démarche pour calculer la norme de fertilisation en P, K et Mg.

des cultures et l'évolution des techniques de production, une actualisation des rendements de référence s'impose à chaque édition de ce document. La concentration en éléments nutritifs des différents produits de grandes cultures doit aussi être constamment révisée et provenir d'essais de fertilisation en conditions optimales et non de la pratique.

La capacité de prélèvement des éléments nutritifs est différente selon les espèces végétales. En effet, même si la disponibilité de l'élément dans le sol est théoriquement suffisante pour couvrir les besoins de la plante, certaines cultures seront incapables d'aller puiser les quantités nécessaires pour leur croissance et d'autres, au contraire, seront capables d'en absorber davantage que leurs besoins. L'approche actuelle des PRIF définit la classe «sol satisfaisant» indépendamment de la culture. Par conséquent, un facteur de correction doit être utilisé pour différencier les cultures selon leurs exigences et leurs capacités d'absorption. Les facteurs de correction proposés dans le tableau 21 ont été établis empiriquement sur la base du savoir d'experts.

**Tableau 21. Coefficients de correction de la norme P, K, Mg selon la culture.**

Culture	P	K	Mg
Céréales d'automne	1,0	0,8	1,0
Maïs	1,2	1,0	1,0
Pomme de terre	1,2	1,2	1,2
Betteraves sucrière et fourragère	1,0	0,8	1,0
Légumineuses à graines	1,0	1,2	1,0
Cultures dérobées	1,0	0,8	1,2
Autres cultures	1,0	1,0	1,0



Champ d'essai de longue durée de fertilisation P et K (photo: Agroscope).

### 3.2.2 Correction de la norme de fertilisation en fonction des analyses de sol

L'analyse du sol permet de moduler la norme de fertilisation P, K et Mg en fonction du degré de disponibilité de l'élément nutritif dans le sol. Cependant, pour le P par exemple, la fraction réellement disponible est toujours

restée une notion un peu théorique car il n'existe aucune méthode universelle de dosage du P disponible capable d'appréhender précisément à la fois la diversité des sols, des climats et des cultures (Demaria *et al.* 2005; Frossard *et al.* 2004). La plupart des pays s'orientent vers la sélection d'un nombre limité d'agents d'extraction, en général deux, et vers une interprétation des résultats valable pour les sols aux caractéristiques les plus répandues. Dès les premières publications des PRIF, la «richesse» du sol était établie en se basant sur une analyse selon la méthode d'extraction à l'eau saturée de CO<sub>2</sub> (Dirks-Scheffer 1930). En 1995, la méthode d'extraction à l'AAE10 (Agroscope 1996) est devenue la nouvelle méthode officielle.

#### 3.2.2.1 Correction de la norme de fertilisation P et K basée sur la méthode CO<sub>2</sub>

L'adaptation de la norme de fertilisation à la richesse en éléments nutritifs du sol s'effectue, pour la méthode CO<sub>2</sub>, à l'aide des facteurs de correction des tableaux 10 et 11 (module 2). Ces facteurs de correction sont valables pour la plupart des sols du plateau suisse, des Préalpes et du Jura possédant un taux de MO inférieur à 10 %. Pour les sols ayant un taux de MO supérieur à 10 %, il faut tenir compte des données du tableau 9 (module 2). L'expérience a démontré que les limons provenant de l'altération des schistes des Grisons ainsi que les sols sableux acides du Tessin requièrent une appréciation particulière en ce qui concerne le P. Les facteurs de correction de la fertilisation P de ces sols sont indiqués dans le tableau 10 (module 2).

#### 3.2.2.2 Correction de la norme de fertilisation Mg basée sur la méthode CaCl<sub>2</sub>

L'interprétation des résultats d'analyse, de même que la correction de la norme de fertilisation, sont effectuées, comme pour le P et le K, en tenant compte de la teneur en argile du sol. Vu les caractéristiques de la solution d'extraction, la teneur optimale du sol (facteur de correction 1,0) augmente avec le taux d'argile (tableau 12, module 2).

#### 3.2.2.3 Correction de la norme de fertilisation P, K et Mg basée sur la méthode AAE10

L'adaptation de la norme de fertilisation pour P, K et Mg s'effectue à l'aide des facteurs de correction des tableaux 16 à 18 (module 2), en prenant en compte la «richesse» du sol en P, K et Mg ainsi que la teneur en argile. Pour les sols dont la teneur en MO est supérieure à 10 %, il faut tenir compte des données du tableau 9 (module 2).

### 3.3 Soufre

Les besoins des cultures en soufre (S) sont principalement couverts par les résidus de récolte, les engrais de ferme et les engrais minéraux. Durant quelques décennies et ce jusqu'en 1980, le S a été fourni en grande partie par les apports atmosphériques liés à la combustion du charbon et de l'huile de chauffage. Ces apports étaient de l'ordre de 30 à 50 kg S/ha/an. Près des zones urbaines, ils pouvaient atteindre jusqu'à 100 kg S/ha/an. De ce fait, même les besoins des plantes les plus exigeantes étaient assurés (tableau 23). L'abandon du charbon et l'élimination du S des huiles de chauffage à partir des années 80 a entraîné une

Tableau 22. Paramètres permettant d'évaluer le risque de carence en S et d'estimer les besoins en fertilisation soufrée des cultures.

Critères	Critères d'appréciation	Points
Matière organique (%)	< 2	1
	2–5	3
	> 5	5
Argile du sol (%)	< 10	1
	10–30	3
	> 30	5
Pierrosité (% du volume)	> 30	1
	10–30	3
	< 10	5
Profondeur utile du sol (en cm)	10–30	1
	31–70	5
	> 70	7
Précipitations octobre–mars (en mm)	> 540	1
	370–540	3
	< 370	5
Engrais de ferme sur la parcelle	Aucun	1
	Occasionnellement (> 3 ans)	3
	Régulièrement (≤ 3 ans)	5
Différence entre la dose de N réellement appliquée et la dose recommandée <sup>1</sup>	Supplément > 40 kg N/ha	1
	Dose recommandée + –40 kg N/ha	3
	Réduction > 40 kg N/ha	5

Les points obtenus pour chaque critère d'appréciation s'additionnent et la somme est comparée avec les indications du tableau 23.

<sup>1</sup> Dose de N calculée d'après la méthode des normes corrigées ou la méthode  $N_{min}$ .

forte réduction des apports de S atmosphérique et l'apparition de symptômes de carence en S sur les cultures les plus exigeantes.

### 3.3.1 Marche à suivre pour déterminer le risque de carence en soufre

La majeure partie de la réserve en S du sol (> 95 % du Stot) se trouve sous forme organique (MO du sol, engrais organique). La plante absorbe le S sous forme de sulfate ( $SO_4^{2-}$ ). La prise en compte des caractéristiques du site (sol, plante et climat) permet de savoir si le potentiel d'une parcelle donnée est suffisant pour assurer l'alimentation en S des plantes cultivées. Ces caractéristiques sont: (i) les teneurs du sol en MO, argile(s) et squelette (ii) la profondeur du sol, (iii) les précipitations d'octobre à mars et (iv) l'application d'engrais organiques et d'engrais N (tableau 22). La nécessité de fertiliser avec du S s'apprécie en comparant ces résultats avec les besoins des cultures (tableau 23, voir également Pellet *et al.* 2003a et b).

### 3.3.2 Forme et moment d'application de la fertilisation soufrée

L'apport de S s'effectue selon les mêmes règles que la fertilisation N (le comportement du sulfate prélevé par les

plantes est semblable à celui du nitrate). L'apport de fond est assuré par les engrais de ferme (1 tonne de fumier ou 1 m<sup>3</sup> de lisier de bovin contient environ 0,3–0,4 kg S). Le meilleur moyen d'appliquer une fertilisation spécifique avec du S consiste à utiliser un engrais N contenant du S (tableau 13, module 4). Il est également possible d'apporter du S au moyen d'engrais minéraux potassiques, magnésiens ou complets dont la teneur en S est suffisante (tableau 13, module 4). Lorsque des symptômes de carence apparaissent, l'application d'une fertilisation foliaire avec un produit compatible (sulfate de magnésium, sel d'Epson) permet de couvrir en partie les besoins momentanés de la plante en S.

## 3.4 Bore, manganèse et autres oligo-éléments

Dans les conditions suisses, une fertilisation régulière avec des oligo-éléments n'est généralement pas nécessaire. De par la composition de leur roche-mère, la plupart des sols contiennent suffisamment d'oligo-éléments pour assurer un rendement optimal et de qualité. Dans quelques cas, une fertilisation avec du B ou du Mn peut s'avérer indispensable. Il s'agit en particulier de cultures exigeantes en B (betterave, colza, tournesol) implantées sur des sols alcalins qui nécessitent en général des apports de 1,5 à 2 kg de B/ha. La disponibilité du Mn est fortement diminuée dans

Tableau 23. Besoins en soufre de quelques cultures et recommandation de fertilisation soufrée.

Culture	Prélèvement en S (kg/ha)	Fertilisation S selon le nombre de points (tableau 22) kg S/ha		
		< 15 points	15–23 points	> 23 points
<b>Culture très exigeante</b>				
Colza	80	60	35	0
<b>Culture moyennement exigeante</b>				
Betterave	35	25	15	0
Luzerne	30	20	15	0
Maïs	28	20	15	0
<b>Culture peu exigeante</b>				
Blé	23	20	10	0
Orge	20	10	0	0
Pomme de terre	20	10	0	0
Autres cultures	< 20	0	0	0

Tableau 24. Apports de B et de Mn basés sur les résultats d'analyse de sol, le type de sol et la culture.

Elément	Classe de fertilité	Appréciation	Teneur du sol (mg/kg)	Sol pauvre à normalement pourvu en MO (< 10 %)		Sol riche en MO et humifère (> 10 %)			
				Culture peu exigeante	Culture exigeante <sup>1</sup>	Sol acide et faiblement acide		Sol neutre et alcalin	
						Culture peu exigeante	Culture exigeante <sup>1</sup>	Culture peu exigeante	Culture exigeante <sup>1</sup>
B	A	pauvre	< 0,6	1,5–2,0 kg B/ha <sup>a</sup>	2,5–3,0 kg B/ha <sup>a</sup>	1,5–2,0 kg B/ha <sup>a</sup>	2,5–3,0 kg B/ha <sup>a</sup>	1,5–2,0 kg B/ha <sup>a</sup>	2,5–3,0 kg B/ha <sup>a</sup>
	B	médiocre	0,6–1,5	–	1,5–2,0 kg B/ha <sup>a</sup>	–	2,0–2,5 kg B/ha <sup>a</sup>	–	2,0–2,5 kg B/ha <sup>a</sup>
	C	satisfaisant riche très riche	1,6–2,0	–					
	D		2,1–5,0						
	E		> 5,0						
			Echangeable	Facilement réductible					
Mn	A	pauvre	< 2	–	20–40 kg Mn/ha <sup>b</sup>	30–50 kg Mn/ha <sup>b</sup>	40–60 kg Mn/ha <sup>b</sup>	10–15 kg Mn/ha <sup>b</sup>	
	B	médiocre	> 2	< 50	20–40 kg Mn/ha <sup>b</sup>		20–40 kg Mn/ha <sup>b</sup>	10–15 kg Mn/ha <sup>b</sup>	
	C	satisfaisant	> 2	> 50	–				

<sup>1</sup> Bore: betterave, colza, tournesol; manganèse: céréales, légumineuses, betterave.

<sup>a</sup> Fertilisation au sol: le bore peut être apporté au sol sous forme de borax, pulvérisé au sol sous forme d'acide borique, ou par des engrais composés boratés.

<sup>b</sup> L'application du manganèse au sol n'étant pas efficace, une application foliaire est nécessaire (dans 600–1000 litres d'eau par ha). Il est recommandé de répéter les applications. Le sulfate de manganèse (MnSO<sub>4</sub>) peut être remplacé par d'autres produits spécifiques contenant du manganèse. Respecter les directives d'utilisation.

les sols alcalins riches en MO; des doses massives de chaux peuvent aussi limiter sérieusement l'alimentation des cultures en B et Mn. Dans des cas particuliers, une évaluation de la teneur en B et en Mn du sol est indispensable. L'interprétation des résultats de ces analyses et le dosage des engrais contenant du B et du Mn figurent dans le tableau 24. Pour les autres oligo-éléments, l'analyse de sol ne se justifie que dans des cas exceptionnels, après avoir pris contact avec le service de vulgarisation ou un laboratoire d'analyse de sol.

#### 4. Résidus de récolte

Les normes de fertilisation comprennent à la fois les besoins en éléments nutritifs du produit principal récolté et ceux des autres sous-produits (tableau 9). Si les sous-produits (paille, fanes, tiges, feuilles, etc.) restent sur le champ (résidus de récolte), les éléments nutritifs qu'ils contiennent sont déduits de la fertilisation de la culture suivante. Comme pour les engrais de ferme, la totalité de la valeur fertilisante des résidus de récolte en P, K et Mg

(tableau 9) doit être prise en considération dans le plan de fumure. En ce qui concerne le N des résidus de récolte disponible pour la culture suivante, il faut prendre en compte les valeurs indiquées dans le tableau 13 lorsque la méthode de calcul des normes corrigées est utilisée. Lorsqu'une partie des résidus de récolte est exportée, la déduction sur la fertilisation de la culture suivante sera proportionnelle à la part qui reste sur le champ.

## 5. Pratique de la fertilisation

La planification de la fertilisation sur une exploitation agricole doit prendre en compte les spécificités propres à l'exploitation. Un conseil de fertilisation doit intégrer les multiples contraintes particulières liées aux types de production (exploitation de grandes cultures, herbagère avec engrais de ferme ou mixte), aux caractéristiques des sols, à l'environnement physique (localisation des parcelles, pente...), au climat, etc. Les exigences propres du mode de production choisi (intégré, biologique, etc.) ajoutent des difficultés supplémentaires à la tâche. Dans chaque cas, le plan fait intervenir la norme de fertilisation, l'objectif de rendement, l'interprétation de l'analyse de sol, ainsi que les quantités et les caractéristiques des engrais organiques et minéraux employés.

### 5.1 Plan de fumure

Un plan de fumure annuel établi de manière consciencieuse est le seul moyen de répondre aux multiples exigences d'une fertilisation raisonnée et ciblée qui prenne en compte les besoins des cultures tout en ménageant l'environnement. Les formulaires et les programmes informatisés nécessaires à l'élaboration du plan de fumure peuvent être obtenus auprès des services de vulgarisation agricole et de la plupart des laboratoires d'analyse de sols.

#### Marche à suivre lors de l'établissement du plan de fumure

1. Etablir les besoins des cultures en fonction du rendement (tableaux 9, 10 et 11).
2. Ajuster la norme de fertilisation P, K et Mg (tableau 9) selon les résultats des analyses de sol (tableaux 10 à 18, module 2) et soustraire la contribution des résidus de récolte du précédent cultural (tableau 13).
3. Ajuster la norme N, soit en appliquant les facteurs de correction selon la méthode de la norme corrigée (tableaux 12 à 17) ou à partir d'une analyse de sol selon la méthode  $N_{\min}$  (tableaux 18 à 20).
4. Estimer la valeur fertilisante des engrais de ferme (tableau 6, module 4) et les apports nécessaires pour chaque culture.
5. Calculer la différence entre les besoins de la culture et les apports des engrais de ferme.
6. Compléter le solde par l'acquisition d'engrais de ferme provenant d'autres exploitations, d'engrais de recyclage ou d'engrais du commerce, en tenant compte des aspects écologiques, pédologiques, agronomiques, techniques, économiques et juridiques.

Lorsqu'on veut effectuer un plan de fumure informatisé, il est important, avant de l'utiliser, de s'assurer que le programme respecte bien la marche à suivre décrite ci-dessus. Le tableau 25 donne un exemple de plan de fumure.

### 5.2 Choix des engrais

Le choix des engrais est dicté par les exigences des plantes et les caractéristiques du sol, mais toujours en relation avec des impératifs techniques. Les critères les plus importants pour le choix d'un engrais sont les exigences spécifiques des différentes cultures, les caractéristiques du sol qui contrôlent le comportement des éléments nutritifs dans le système engrais-sol-plante (pH, MO, texture, état de la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol, etc.) ainsi que ses teneurs en substances complémentaires utiles (chaux, soufre, oligo-éléments) et non désirées (substances dangereuses). Les aspects économiques ne devraient intervenir qu'entre des produits aux caractéristiques similaires et répondant aux mêmes besoins de fertilisation. Les tableaux 9 à 12 du module 4 décrivent les caractéristiques et les effets des différentes formes des éléments nutritifs contenus dans les engrais.

#### 5.2.1 Céréales

Pour les céréales, une fertilisation N liquide mélangeant des formes nitrique et uréique permet une mise à disposition régulière de N pour la plante. Cependant, le développement de cette technique a été freiné par la nécessité d'une mécanisation adaptée (stockage et épandage de l'engrais liquide), par les risques de brûlure selon le stade de la culture et les conditions atmosphériques au moment de l'apport et par les risques de pertes par volatilisation selon le pH du sol. Actuellement, des engrais N permettant une libération plus lente du N sont en plein développement. Ils pourraient permettre de simplifier le fractionnement actuellement recommandé pour les engrais à base de nitrate d'ammoniaque (tableau 26).

#### 5.2.2 Pomme de terre

La pomme de terre est une plante acidophile qui réagit bien aux engrais à effet acidifiant. Il est en effet possible de corriger quelque peu les effets du sol par des applications d'engrais à effet acidifiant, comme le sulfate d'ammonium et/ou le sulfate de potassium (Fritsch 2003).

Les engrais N sous forme liquide ou uréique ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ ) sont plus sensibles à la volatilisation ( $\text{NH}_3$ ) que le nitrate d'ammonium ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ). La différence d'efficacité entre ces trois composés azotés repose principalement sur leur mode d'application. L'enfouissement de l'engrais au buttage permet de limiter ou même de supprimer les pertes par volatilisation. Dans ce cas, les trois composés présentent une efficacité comparable. En revanche, si l'engrais est apporté sans enfouissement, soit après le buttage, soit plusieurs jours avant le buttage, le nitrate d'ammonium offre l'avantage de limiter les pertes par volatilisation, surtout en l'absence de précipitations.

Tableau 25. Exemple d'un plan de fumure.

Restriction de fertilisation		Aucune					
Utilisation des surfaces	Désignation	Surface	Rendement				
Parcelle	Derrière Le Bois	1,17 ha					
Culture précédente	Blé d'automne, paille enfouie	1,17 ha	60 dt/ha				
Culture intermédiaire	Engrais vert non hivernant, légumineuse	1,17 ha	35 dt/ha				
Culture principale	Maïs grain sec	1,17 ha	100 dt/ha				
Analyse de sol	Résultat	Unités	Méthode	Interprétation	Facteur de correction		
Année	2016						
Argile	20	[%]		Moyen, silt limoneux			
Silt	70	[%]					
Sable	10	[%]					
pH	6,4	[H <sub>2</sub> O]		Neutre			
MO	4,5	[%]		Moyen-élevé			
P	22,7	[mg/kg]	AA-EDTA	Médiocre	1,2	(tableau 16, mod. 2)	
K	137	[mg/kg]	AA-EDTA	Satisfaisant	1,0	(tableau 17, mod. 2)	
Mg	112,8	[mg/kg]	AA-EDTA	Médiocre	1,2	(tableau 18, mod. 2)	
Besoins [kg/ha] (+)				N	P	K	Mg
Norme de base cult. int./eng. vert	(tableau 9)			0	0	0	0
Norme de base cult. princ.	(tableau 9)			110	38	195	25
Correction rendement cult. princ.	(tableau 11)			0	0	0	0
Potentiel de minéralisation	(tableau 12)	Moyen – élevé		-20	0	0	0
Précédent cultural	(tableau 13)	Engrais vert		-10	0	0	0
Pluie d'hiver et de printemps	(tableau 15)	Fortes (mars-mai)		30	0	0	0
Sarclage	(tableau 16)			0	0	0	0
Effet des conditions printanières	(tableau 17)	Printemps chaud		-20	0	0	0
Facteur de correction	(selon analyse de sol)				1,2	1,0	1,2
<b>(1) Somme des besoins corrigés</b>				<b>90</b>	<b>46</b>	<b>195</b>	<b>30</b>
Apports année précédente [kg/ha] (-)				N	P	K	Mg
Bilan de l'année précédente	(valeurs >0: surplus en fertilisant)			-	-15	-10	7
Arrière-effet N	(tableau 14)			0	-	-	-
Résidus de récolte de l'année précédente	(tableau 9)			0	6	62	5
Correction libre				0	0	0	0
<b>(2) Somme des apports de l'année précédente</b>				<b>0</b>	<b>-9</b>	<b>52</b>	<b>12</b>
<b>(3) Besoins totaux corrigés = (1)-(2)</b>				<b>90</b>	<b>55</b>	<b>143</b>	<b>18</b>
Apports par les engrais du commerce [kg/ha] (-)		Apport/ha	N	P	K	Mg	
Nitrate d'ammoniaque 27 %		3,30 dt/ha	89	0	0	0	
Potasse magnésienne (25 % K/6 % Mg)		5,70 dt/ha	0	0	143	34	
Super-triple (20 % P)		2,75 dt/ha	0	55	0	0	
<b>(4) Somme des apports par les engrais</b>				<b>89</b>	<b>55</b>	<b>143</b>	<b>34</b>
<b>Solde encore à couvrir = (3)-(4) (valeurs &gt;0 : déficit en fertilisant)</b>				<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-16</b>

Lorsque tout l'apport d'azote est réalisé à la plantation ou au buttage, il est préférable de privilégier l'urée ou le sulfate d'ammonium  $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$  pour lesquels la libération de l'azote est plus lente que pour le nitrate d'ammonium.

Les engrais K sous forme de chlorure ou de sulfate de potassium présentent des effets similaires sur le rendement. Les engrais à base de chlorure réduisent le brunissement à la friture et permettent également de modérer la teneur en amidon. Au contraire, le sulfate permet d'augmenter la teneur en amidon des pommes de terre.

Concernant les engrais P, on privilégiera les engrais solubles, facilement assimilables par la plante (Cohan 2014; Ryckmans 2009).

### 5.2.3 Maïs

Compte tenu de son profil de croissance spécifique qui se prolonge jusqu'à l'automne, le maïs est capable de bien valoriser les engrais de ferme qui libèrent lentement les nutriments qu'ils contiennent. Il en va de même pour l'utilisation de l'azote minéralisé à partir des réserves du sol. Parmi les engrais organiques d'origine animale, comme le purin, le fumier ou le lisier, le purin occupe une place particulière. Un apport peut être fait avant le semis (cependant le plus près possible) et immédiatement incorporé au sol pour éviter des pertes d'ammoniac par volatilisation. Le purin peut aussi être apporté après le semis, entre les lignes de la culture en croissance et avec incorporation rapide au sol. Il s'agit de ne pas mouiller les feuilles et risquer de perdre ainsi de l'ammoniac.

On peut aussi utiliser sans problème des engrais synthétiques du commerce, en quantités tenant compte des besoins de la culture et des réserves disponibles dans le sol. L'application localisée d'un engrais contenant du P et du N facilement disponibles, près des semences, peut stimuler le développement juvénile de la culture, particulièrement en terres froides.

## 5.3 Moment d'application et fractionnement des apports

### 5.3.1 Céréales

La fertilisation N est répartie habituellement en 2 ou 3 apports (tableau 26) réalisés à des stades spécifiques du développement de la plante (figure 1). Sa valorisation dépendra de plusieurs facteurs, en particulier de la pluviométrie, du type de sol et du développement de la culture. Des études montrent que le coefficient d'utilisation du N de l'engrais augmente au cours du cycle de la culture, passant de 40 – 50 % au stade tallage à environ 80 % quand la dernière feuille est étalée (Arvalis 2014).

Des essais récents ont confirmé que la dose de N et sa répartition sont importantes pour la formation du rendement en grains et la synthèse des protéines (Levy et Brabant 2016). A dose de N égale, un apport tardif à la floraison conduit systématiquement à un rendement en grain



Apport d'engrais différenciés sur la culture de blé (photo: Agroscope).

plus faible qu'un apport plus précoce. Un 3<sup>e</sup> apport de N augmente souvent la teneur en protéines, ce qui est important pour la classe Top. A apport total de N équivalent (140 kg N/ha), un apport important au moment de l'apparition de la dernière feuille (80 kg N/ha plutôt que 40 kg N/ha) augmente la teneur en protéines (de 0,4 %) sans affecter le rendement (Levy et Brabant 2016). Le choix variétal reste toutefois le facteur le plus facile à maîtriser pour influencer la teneur en protéines du blé.

### 5.3.2 Pomme de terre

Le fractionnement des apports en N permet de limiter les pertes par lixiviation en ajustant les apports à la dynamique des besoins de la culture (tableau 26; figure 2). Le dernier apport ne doit pas être effectué trop tardivement, car cela favoriserait le développement du feuillage sans bénéfice pour le développement des tubercules. Idéalement, le dernier apport devrait avoir lieu avant l'initiation de la tubérisation, c'est-à-dire quand les plantes mesurent approximativement 20 cm de hauteur (code BBCH 105). De plus, les variétés présentent des dynamiques de prélèvement en N variables au cours du temps. Par exemple, la variété Laura absorbe moins de N que la variété Bintje en début de saison (figure 9) car il lui faut plus de temps que Bintje pour développer son système racinaire et initier sa tubérisation (Sinaj et al. 2014). Ceci justifie donc de fractionner les apports de sorte que chaque variété puisse disposer du N nécessaire à son développement au moment où elle en a besoin.

Le fractionnement des apports K peut aussi être pratiqué, surtout sur des sols de texture légère pour lesquels le lessivage est possible. Dans la pratique, la moitié du K est appliquée entre janvier et mars (sous forme organique ou minérale), l'autre moitié à la plantation. Un apport complémentaire peut aussi être appliqué après le buttage, voire même lors de la tubérisation.

Afin d'éviter les problèmes liés à la fixation du P des engrais sur la phase solide du sol et pour augmenter son utilisation par la plante, il est préférable de l'apporter lors de la plantation. Un second apport foliaire peut aussi être



**Tableau 26. Fractionnement, stade d'application optimal et dose maximale admissible pour les différents apports de N selon la pluviométrie et les conditions pédologiques.**

Culture ou groupe de cultures	Régions séchées <sup>1</sup> ou sols profonds <sup>2</sup>		Régions pluvieuses <sup>3</sup> ou sols peu profonds <sup>4</sup>	
	Epoque ou stade	Apport maximal (kg N/ha)	Epoque ou stade	Apport maximal (kg N/ha)
<b>Céréales, millet et maïs</b>				
Céréale d'automne	En automne (avant ou après semis)	0	En automne (avant ou après semis)	0
	Fin hiver à la reprise végétation	60	Reprise végétation	60
	Début redressement à 1 nœud	80	1 nœud	70
	Dernière feuille étalée	80	Dernière feuille étalée épiaison	80
	Pas de 3 <sup>e</sup> apport pour le blé biscuitier		Pas de 3 <sup>e</sup> apport pour le blé biscuitier	
Céréale de printemps	Au semis	40	Au semis	30
	Tallage à début redressement	80	3 feuilles à début tallage	50
	2 nœuds à gaine ouverte	40	1 <sup>er</sup> nœud	40
			Apparition dernière feuille à début épiaison	40
Millet	Au semis	40	Au semis	40
	Tallage	40	Tallage	40
Maïs grain et maïs d'ensilage	Au semis	80	Au semis	40
	6–8 feuilles	80	4–6 feuilles	40
			6–8 feuilles	80
Maïs vert	Au semis	60	Au semis	40
	4–6 feuilles	30	4–6 feuilles	40
<b>Tubercules et racines</b>				
Pomme de terre de consommation et industrielle	Plantation	80	Plantation	40
	Levée à feuillage 10 cm	80	Feuillage 10–15 cm	80
			Peu avant que les fanes se touchent sur la ligne	40
Pomme de terre primeur	Plantation	60	Plantation	40
	Levée à feuillage 10 cm	60	Feuillage 5–10 cm	80
Pomme de terre plant	Plantation	50	Plantation	40
	Levée à feuillage 10 cm	50	Feuillage 5–10 cm	60
Betteraves sucrière et fourragère	Au semis	80	Au semis	40
	4–6 feuilles	80	4–6 feuilles	60
			6–8 feuilles	60
<b>Oléagineux et plantes destinées à la production de fibres</b>				
Colza d'automne	Au semis	0	Au semis	0
	Fin hiver à reprise végétation	80	Reprise végétation	80
	Début montaison	80	Montaison (30–40 cm)	80
Colza de printemps	Au semis	50	Au semis	30
	Formation des rosettes, début montaison	80	Rosettes	60
			Montaison (30–40 cm)	40
Tournesol	Au semis	80	Au semis	60
Chanvre oléagineux	Au semis	40	Au semis	40
	Plante 15–20 cm	40	Plante 15–20 cm	30
Chanvre à fibres	Au semis	50	Au semis	40
	Plante 15–20 cm	70	Plante 15–20 cm	80

<sup>1</sup> < 450 mm de précipitations de janvier à juin.

<sup>2</sup> Réserve en eau facilement utilisable > 70 mm.

<sup>3</sup> > 450 mm de précipitations de janvier à juin.

<sup>4</sup> Réserve en eau facilement utilisable < 70 mm.

Tableau 26 (suite)

Culture ou groupe de cultures	Régions séchées <sup>1</sup> ou sols profonds <sup>2</sup>		Régions pluvieuses <sup>3</sup> ou sols peu profonds <sup>4</sup>	
	Epoque ou stade	Apport maximal (kg N/ha)	Epoque ou stade	Apport maximal (kg N/ha)
<b>Oléagineux et plantes destinées à la production de fibres</b>				
Lin oléagineux	Au semis	50	Au semis	20
	Plante 15–20 cm	30	Plante 15–20 cm	40
Lin à fibres	Au semis	30	Au semis	20
	Plante 15–20 cm	30	Plante 15–20 cm	40
Roseau de Chine	Début végétation	40	Début végétation	40
Kénaif	Au semis	50	Au semis	30
	Plante 15–20 cm	50	Plante 15–20 cm	60
<b>Autres cultures</b>				
Engrais verts	Au semis	40	Au semis	40
Tabac Burley	Plantation	100	Plantation	80
	4–6 feuilles	80	4–6 feuilles	100
Tabac Virginia	Plantation	30	4–6 feuilles	30

<sup>1</sup> < 450 mm de précipitations de janvier à juin.

<sup>2</sup> Réserve en eau facilement utilisable > 70 mm.

<sup>3</sup> > 450 mm de précipitations de janvier à juin.

<sup>4</sup> Réserve en eau facilement utilisable < 70 mm.



Apport d'engrais différenciés sur la culture de pomme de terre (photo: Agroscope).

réalisé peu avant l'initiation de la tubérisation. Si une seule application d'engrais PK est réalisée, il est recommandé de l'appliquer tôt dans la saison afin de palier à la faiblesse du système racinaire.

### 5.3.3 Maïs

Jusqu'au stade 6 feuilles, les besoins du maïs en éléments fertilisants sont faibles (figure 4). Toutefois, dans les sols qui se réchauffent lentement, une fertilisation localisée au semis peut stimuler le développement juvénile. Pour les éléments peu mobiles (P, K) l'idéal est de les épandre avant le semis. L'azote, en revanche, doit être épandu de manière fractionnée (tableau 26) pour tenir compte du risque de lessivage, en particulier dans les régions à fortes précipitations ou dans les bassins ver-

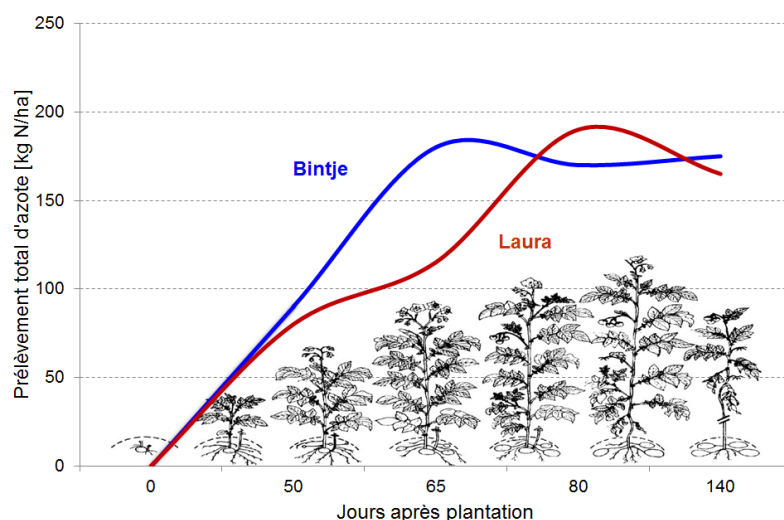


Figure 9. Courbes d'absorption du N par les variétés Bintje et Laura pour un apport de 120 kg N/ha (Sinaj et al. 2014).

sants aboutissant dans un lac. Dans de telles situations, les apports foliaires devraient être effectués seulement au moment où les besoins du maïs sont élevés (figure 4). Compte tenu de la simultanéité de la minéralisation de l'azote dans le sol et des besoins du maïs, les apports effectués jusqu'au stade 8 feuilles sont les plus efficaces pour couvrir les besoins importants jusqu'au stade floraison.

## 5.4 Techniques d'épandage

### 5.4.1 Pomme de terre

Le fractionnement des apports en N (tableau 26) est de moins en moins pratiqué par les producteurs de pommes de terre et la dose totale de N est souvent apportée en une seule fois à la plantation. Cette pratique peut aller de pair avec les techniques de plantation dites all-

in-one, de plus en plus populaires, et par lesquelles la plantation, le buttage et l'apport d'engrais se font en une seule opération. Si auparavant la fertilisation N était apportée sur les buttes avant un buttage, il est désormais courant d'appliquer l'engrais N avant la plantation ou localement sur le rang (Martin 2014). En matière d'optimisation de la disponibilité en N pour la plante, cette pratique n'est pas idéale car une bonne partie du N apporté peut être lessivé avant que la plante n'ait eu le temps de développer son système racinaire (Sinaj *et al.* 2014).

La fertigation est déjà pratiquée depuis de nombreuses années aux Etats-Unis et dans les pays du bassin méditerranéen. La technique consiste à associer l'engrais à l'eau d'irrigation. Elle offre deux avantages principaux: (i) sa facilité de mise en œuvre (une fois le système d'irrigation installé) et (ii) son aspect «dynamique», c'est-à-dire qu'elle permet de fournir l'eau et les éléments nutritifs à la plante au moment où elle en a besoin. Les techniques de fertigation au goutte-à-goutte permettent de limiter les pertes de N par lessivage en comparaison à l'irrigation par sprinkler (Darwish *et al.* 2003). En revanche, aucune augmentation significative du rendement n'est observée par rapport à une fertilisation classique (Battilani *et al.* 2008; Mohamad *et al.* 1999).

#### 5.4.2 Maïs

Les engrais sont épandus avant le semis et incorporés au sol ou localisés (P et N) près de la ligne au moment du semis. Les épandages d'azote doivent être fractionnés et les quantités doivent être nuancées selon le climat et le sol, sans dépasser les valeurs indiquées dans le tableau 26. Un apport foliaire en surface à un stade plus avancé est possible mais il vaut mieux éviter les risques de brûlure des feuilles. Un épandage entre les lignes, avec incorporation immédiate, évite ce risque et place l'engrais directement à portée des racines. Dans le cas de l'épandage entre les lignes, ou s'il y a des paquets d'engrais, les racines se développent principalement dans l'espace proche des nutriments. En revanche, la répartition spatiale réalisée par l'épandage en surface favorise le développement d'une masse racinaire en tous sens.

Les engrais de ferme doivent être injectés dans le sol ou rapidement incorporés après épandage afin de réduire autant que possible les pertes d'azote par volatilisation.

### 5.5 Possibilités d'optimisation ou de réduction de la fertilisation N

L'optimisation de l'utilisation de l'azote proposée par les méthodes de fertilisation présentées plus haut (voir chapitre 3.1) peut être encore renforcée par une stratégie dynamique de la fertilisation à l'échelle de l'exploitation. Une pratique extensive de la fertilisation est aussi envisageable. Dans ce cas, les recommandations suivantes peuvent être formulées:

- Dans le cadre d'une fertilisation équilibrée à l'échelle de l'exploitation, procéder à la distribution d'un contingent

limité de N sur les cultures selon des critères économiques.

- Diluer suffisamment les apports de purin (au minimum 1:2, idéalement 1:3) afin de limiter les pertes par volatilisation (module 7).
- Diminuer le risque de pertes en N par volatilisation en choisissant des engrais dont la proportion en nitrates est plus importante.
- Eviter d'appliquer une dose fractionnée supérieure à 60 kg N/ha.
- Tenir compte de manière systématique des réserves du sol ( $N_{\min}$  ou normes corrigées).
- Planifier les apports d'engrais à l'échelle de l'exploitation pour tenir compte des besoins spécifiques des cultures les plus exigeantes et des cultures valorisant le mieux le N.
- Réduire, voire même faire l'impasse sur le 3<sup>e</sup> apport de N pour les céréales ou décaler le 2<sup>e</sup> apport, surtout en cultures extensives, pour les blés fourragers.
- Considérer les prévisions météorologiques à moyen terme pour éviter d'amener du N en trop grande quantité avant une période particulièrement pluvieuse ou trop tard par rapport à des prévisions de conditions sèches.
- Supprimer l'apport de N au semis ou à la plantation pour les betteraves, le maïs et les pommes de terre.
- Renoncer à tout apport de N pour les engrais verts en utilisant des mélanges à base de légumineuses pour les conditions avec une faible minéralisation.

### 5.6 Possibilités de simplification de la fertilisation P, K et Mg

La fertilisation de rotation permet de simplifier la fertilisation annuelle en P, K et Mg sur une parcelle dont la rotation est définie. Elle consiste à totaliser les besoins nets de la rotation, à les diviser par le nombre de cultures et à appliquer annuellement la quantité moyenne obtenue. Cette manière de faire nécessite l'élaboration d'un plan de fumure et ne convient que pour les parcelles dont la rotation est stable. Elle est aisément applicable dans les parcelles dont le niveau de fertilité est «satisfaisant» ou «riche» (classe de fertilité C ou D). Elle peut devenir problématique lorsque le sol est «pauvre» et que la rotation comprend (i) soit une culture ayant des besoins élevés, (ii) soit une culture susceptible de faire une consommation de luxe d'un de ces éléments. Lors de l'établissement du plan de fumure, il se peut aussi que la quantité d'engrais P, K et Mg à appliquer sur certaines parcelles soit faible ou qu'elle soit difficile à épandre d'un point de vue technique. Dans ce cas une impasse peut être envisagée selon les critères du tableau 27.

**Impasse:** Renoncement à tout apport d'engrais minéral parce que les besoins de la culture envisagée sont largement couverts par les réserves du sol, par les restitutions de la culture précédente ou, le cas échéant, par la fertilisation organique et la déduction anticipée des résidus de récolte de la culture à venir (par ex. avec du tournesol). L'impasse peut être faite lorsque les quantités d'engrais minéral à apporter sont très faibles et ne représentent qu'une fraction de la norme.

**Tableau 27. Possibilités d'impasse sur la fertilisation minérale P, K et Mg en fonction de la richesse du sol et de la profondeur utile.**

Fertilité du sol selon analyse	Profondeur utile du sol <sup>1</sup>	Possibilité de renoncer à PK	Possibilité de renoncer à Mg
Pauvre	superficiel	non	non
	profond	non	non
Médiocre	superficiel	non	non
	profond	oui	oui
Satisfaisant	superficiel	oui	non
	profond	oui	oui
Riche	superficiel	oui	oui
	profond	oui	oui

<sup>1</sup> Sol superficiel: < 70 cm de profondeur utile;  
sol profond: > 70 cm de profondeur utile.

## 6. Bibliographie

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

Agu C. M., 2006. Effect of nitrogen and phosphorus combination on late blight disease and potato yield. *Tropical Science* 44 (4), 163–165.

Allison M. F., Fowler J. H. & Allen E. J., 2001a. Factors affecting the magnesium nutrition of potatoes (*Solanum tuberosum*). *Journal of Agricultural Science* 137, 397–409.

Allison M. F., Fowler J. H. & Allen E. J., 2001b. Responses of potato (*Solanum tuberosum*) to potassium fertilizers. *Journal of Agricultural Science* 136, 407–426.

Arvalis, 2014. Optimiser l'alimentation de la plante en fractionnant l'azote. In: Interventions de printemps : un tournant décisif pour réussir ses cultures. ARVALIS-CETIOM infos, janvier 2014, 3–4.

Arnon I., 1975. Mineral nutrition of Maize. International potash institute, Bern, Switzerland. 452 p.

Aubertot J. N., Pinochet X. & Doré T., 2003. The effects of sowing date and nitrogen availability during vegetative stages on *Leptosphaeria maculans* development on winter oilseed rape. *Crop Protection* 23 (7), 635–645.

Battilani A., Plauborg F., Hansen S., Dolezal F., Mazurczyk W., Bizik J. & Coutinho J., 2008. Nitrogen uptake and nitrogen use efficiency of fertigated potatoes. *Acta Horticulturae* 792, 61–67.

Bedoussac L., Journet E.-P., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre-Hellou G., Jensen E. S., Prieur L. & Justes E., 2015. Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 35, 911–935.

Brabant C. & Levy Häner L., 2016. Influence de la fumure azotée et de son fractionnement sur la qualité boulangère du blé. *Recherche Agronomique Suisse* 7 (2), 88–97.

Büchi L., Gebhard C.-A., Liebisch F., Sinaj S., Ramseier H. & Charles R., 2015. Accumulation of biologically fixed nitrogen by legumes cultivated as cover crops in Switzerland. *Plant and Soil* 393 (1), 163–175.

Büchi L., Mouly P., Amossé C., Bally C., Wendling M. & Charles R., 2016. Méthode non destructive d'estimation de la biomasse et des nutriments de couverts végétaux. *Recherche Agronomique Suisse* 7 (3), 136–143.

Buchner A. & Sturm H., 1985. Gezielter Düngen. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, Germany. 381 p.

Burns I. G., 2006. Assessing N fertilizer requirements and the reliability of different recommendation systems. *Acta horticulturae* 700, 35–48.

**Seuils de renoncement:** Le renoncement est envisageable (i) en dessous de 100 kg/ha d'engrais pour les engrais P et K simples ou composés et (ii) en dessous de 50 kg/ha d'engrais pour les engrais magnésiens spécifiques.

**Report des déficits:** Renoncer à un apport implique que les déficits du bilan parcellaire seront pris en compte dans le plan de fumure de l'année suivante.

Buschbell T. & Hoffmann G. M., 1992. The effects of different nitrogen regimes on the epidemiologic development of pathogens on winter-wheat and their control. *Journal of Plant Diseases and Protection* 99, 381–403.

Cao W. & Tibbitts T. W., 1998. response of potatoes to nitrogen concentrations differ with nitrogen forms. *Journal of Plant Nutrition* 21 (4), 615–623.

Champolivier L. & Reau R., 2005. Améliorer la richesse en huile des oléagineux pour répondre aux besoins du marché. *Oléoscope* 82, 10–13.

Charles R., Cholley E. & Mascher-Frutschi F., 2011. Maladies et rendement de blé d'automne: influence du système de culture. *Recherche Agronomique Suisse* 2 (6), 264–271.

Charles R. & Vulliod P., 2001. Pois protéagineux et azote dans la rotation. *Revue suisse d'Agriculture* 33 (6), 265–270.

Charles R., Collaud J.-F., Levy L. & Sinaj S., 2012. Variétés, densité de semis et fumure azotée sur orge d'automne. *Recherche Agronomique Suisse* 3 (2), 88–95.

Cohan J.P., 2014. Engrais, bien choisir la forme à apporter. In: Innovations et performances pour la pomme de terre. ARVALIS infos, juin 2014, 14–15.

Colin J. & Goffart J. P., 1998. La gale commune de la pomme de terre en Belgique: Ses causes, ses conséquences, ses remèdes. Centre de Recherche Agronomique, Gembloux; Station de Phytotechnie, Louvain-la-Neuve; Université Catholique du Louvain, Clinique des Plantes (CORDER). 35 p.

Colomb B., 1992. Le magnésium: bases disponibles pour l'élaboration d'un système de recommandation de fumure. In: Le magnésium en agriculture. Editions C.H.E.M.C., INRA, Paris, France, 187–209.

COMIFER, 2013. Calcul de la fertilisation azotée – Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales – Cultures annuelles et prairies. Editions COMIFER, Puteaux, 159 p. Accès: [http://www.comifer.asso.fr/images/publications/brochures/BROCHURE\\_AZOTE\\_20130705web.pdf](http://www.comifer.asso.fr/images/publications/brochures/BROCHURE_AZOTE_20130705web.pdf) [10. 5. 2017].

Courvoisier N., Levy Häner L., Schwaerzel R., Bertossa M., Thévoz E., Hiltbrunner J., Anders M., Stoll P., Weissflog T., Scheuner S., Dugon J. & Grünig K., 2015. Liste recommandée des variétés de céréales pour la récolte 2016. *Recherche Agronomique Suisse* 6 (6), 1–8.

Darwish T., Atallah T., Hajhasan S. & Chranek A., 2003. Management of nitrogen by fertigation of potato in Lebanon. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 67 (1), 1–11.

Datnoff L. E., Elmer W. H. & Huber D. M., 2009. Mineral nutrition and plant disease. 2nd edition. APS Press, St. Paul, Minnesota, USA. 278p.

Debaeke P. & Estragnat A., 2003. A simple model to interpret the effects of sunflower crop management on the occurrence and severity of a major fungal disease: *Phomopsis stem canker*. *Field crop research* 83,139–155.

- Debaeke P. & Perez, A. 2003. Influence of sunflower (*Helianthus annuus* L.) crop management on Phoma black stem (Phoma macdonaldii Boerema). *Crop Protection* 22, 741–752.
- Demaria P., Flisch R., Frossard E. & Sinaj S., 2005. Exchangeability of phosphate extracted by four chemical methods. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168, 89–93.
- Dirks-Scheffer, 1930. Der Kohlensäure-Bikarbonatauszug und der Wasserauszug als Grundlage zur Ermittlung der Phosphorsäurebedürftigkeit der Böden. *Landwirtschaftliche Jahrbücher* 71, 73–99.
- Dupuis B., Reust W., Hebeisen T. & Ballmer T., 2009. Fumure azotée de nouvelles variétés de pommes de terre cultivées en Suisse. *Revue suisse d'Agriculture* 41 (4), 209–214.
- Fritsch F., 2003. Anwendung von Düngemitteln in landwirtschaftlichen Kulturen: Kartoffeln. In: *Praxishandbuch Dünger und Düngung*, AGRIMEDIA GmbH, Bergen/Dumme, Germany. 311 p.
- Frossard E., Julien P., Neyroud J.-A. & Sinaj S., 2004. Le phosphore dans le sol. Etat de la situation en Suisse. *Cahier de l'environnement n°368*, Office fédéral de l'environnement, des forêts et des paysages, Berne, Suisse, 180 p.
- Gash A. F. J., 2012. Wheat nitrogen fertilisation effects on the performance of the cereal aphid *Metopolophium dirhodum*. *Agronomy* 2 (1), 1–13.
- Hack H., 1993. Echelle BBCH des stades phénologiques de la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.). *JKI Open Journal System* 7.
- Holzschläger A., Fossati D., Hiltbrunner J. & Fuhrer J., 2015. Spatial and temporal trends in agro-climatic limitations to production potentials for grain maize and winter wheat in Switzerland. *Regional Environmental Change* 15 (1), 109–122.
- Hebeisen T., Ballmer T., Wüthrich R. & Dupuis B., 2012. Réaction à la fumure azotée de nouvelles variétés de pommes de terre admises à la liste officielle. *Recherche Agronomique Suisse* 1 (3), 82–87.
- Iwama K., 2008. Physiology of the Potato: New Insights into Root System and Repercussions for Crop Management. *Potato research* 51 (3–4), 333–353.
- Jordan V. W. L., Stinchcombe G. R. & Hutcheon J. A., 1989. Fungicide and nitrogen applications in relation to the improvement of disease control and yield in winter barley. *Plant Pathology* 38, 26–34.
- Justes E., Beaudoin N., Bertuzzi P., Charles R., Constantin J., Dürr C., Hermon C., Joannon A., Le Bas C., Mary B., Mignolet C., Montfort F., Ruiz L., Sarthou J. P., Souchère V., Tournebize J., Savini I. & Réchauchère O., 2013. Les cultures intermédiaires pour une production agricole durable. Editions Quae, Versailles, France. 112 p.
- Justes E., Mary B. & Nicolardot B., 2009. Quantifying and modeling C and N mineralization kinetics of catch crop residues in soil: parameterization of the residue decomposition module of STICS model for mature and non mature residues. *Plant and Soil* 325, 171–185.
- Karam F., Roupheal Y., Lahoud R., Breidi J. & Colla G., 2009. Influence of genotypes and potassium application rates on yield and potassium use efficiency of potato. *Journal of agronomy* 8 (1), 27–32.
- Kolbe H. & Stephan-beckmann S., 1997. Development, growth and chemical composition of the potato crop (*Solanum tuberosum* L.). II. Tuber and whole plant. *Potato Research* 40 (2), 135–153.
- Krnjaja V., Mandic V., Levic J., Stankovic S., Petrovic T., Vasic T. & Obradovic A., 2015. Influence of N-fertilisation on Fusarium head blight and mycotoxin levels in winter wheat. *Crop Protection* 67, 251–256.
- Lagarde F. & Champolivier L., 2006. Le raisonnement et les avancées techniques permettent de réduire la fertilisation azotée : le cas de Farmstar-colza®. *OCL* 13, 384–387.
- Lemmens M., Haim K., Lew H. & Ruckenbauer P., 2004. The Effect of Nitrogen Fertilization on Fusarium Head Blight Development and Deoxynivalenol Contamination in Wheat. *Journal of Phytopathology* 152 (1), 1–8.
- Levy L., Schwaerzel R., Kleijer G. & Crozet N., 2009. Influence de la fumure azotée sur la qualité des blés biscuitiers. *Revue suisse d'Agriculture* 41 (5), 277–282.
- Levy L., Schwaerzel R. & Kleijer G., 2007. Influence de la fumure azotée sur la qualité des céréales panifiables. *Revue suisse d'Agriculture* 39, 255–260.
- Levy L. & Schwaerzel R., 2009. Fumure azotée et performances agronomiques de variétés de blé et de triticales. *Revue suisse d'Agriculture* 41 (3), 161–165.
- Levy Häner L., Stamp P., Kreuzer M., Bouguennec A. & Pellet D., 2013. Experimental Determination of Genetic and Environmental Influences on the Viscosity of Triticale. *Cereal Research Communications* 41 (4), 613–625.
- Levy Häner L. & Brabant C. 2016. L'art de fractionner l'azote pour optimiser le rendement et la teneur en protéines du blé. *Recherche Agronomique Suisse* 7 (2), 80–87.
- Limaux F., Recous S., Meynard J.M. & Guckert A., 1999. Relationship between rate of crop growth at date fertiliser N application and fate of fertiliser N applied to winter wheat. *Plant and Soil* 214, 49–59.
- Lucas M. E., Hoad S. P., Russell G. & Bingham I. J., 2000. Management of cereal root systems. *Research review No. 43*. HGCA.
- Machet J.M., Recous S., Jeuffroy M.H., Mary B., Nicolardot B. & Parnaudeau V., 2003. A dynamic version of the predictive balance sheet method for fertilizer N advice. In: *Controlling nitrogen flows and losses*, 12th Nitrogen Workshop, 21st–24th September 2003, Exeter, Devon, UK.
- Maltas A., Oberholzer H., Charles R., Bovet V. & Sinaj S., 2012a. Effet à long terme des engrais organiques sur les propriétés du sol. *Recherche Agronomique Suisse* 3 (3), 148–155.
- Maltas A., Charles R., Bovet V. & Sinaj S., 2012b. Effet à long terme des engrais organiques sur le rendement et la fertilisation azotée des cultures. *Recherche Agronomique Suisse* 3 (3), 156–163.
- Maltas A., Charles R., Jeangros B. & Sinaj S., 2013. Effect of organic fertilizers and reduced-tillage on soil properties, crop nitrogen response and crop yield: Results of a 12-year experiment in Changins, Switzerland. *Soil & Tillage Research* 126, 11–18.
- Maltas A., Charles R., Pellet D., Dupuis B., Baux A., Jeangros B. & Sinaj S., 2015. Evaluation de deux méthodes pour optimiser la fertilisation azotée des grandes cultures. *Recherche Agronomique Suisse* 6 (3), 84–93.
- Martin M., 2014. Implantation : attention à la structure du sol. In: *Innovations et performances pour la pomme de terre*, ARVALIS infos, Juin 2014, 10–12.
- Mascagni H.J. Jr., Harrison S.A., Russin J.S., Desta H.M., Colyer P.D., Habetz R.J., Hallmark W.B., Moore S.H., Rabb J.L., Hutchinson R.L. & Boquet D.J., 1997. Nitrogen and fungicide effects on winter wheat produced in the Louisiana Gulf Coast region. *Journal of Plant Nutrition* 20 (10), 1375–1390.
- Mestries E., Desanlis M., Seassau C., Moinard J., Debaeke P. & Dechamp-Guillaume G., 2011. Impact de la conduite de culture sur les maladies du tournesol. *Innovations agronomiques* 14, 91–108.
- Micheneau A., Champolivier L., Courtois N., Sinaj S., & Baux A., 2016. Réglette azote colza®: adaptation pour la Suisse d'un outil d'aide à la fertilisation azotée du colza. *Recherche Agronomique Suisse* 7 (9), 378–383.
- Mohammad M. J., Zuraiqi S., Quasameh W. & Papadopoulos I., 1999. Yield response and nitrogen utilization efficiency by drip-irrigated potato. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 54 (3), 243–249.
- Naud C., Makowski D. & Jeuffroy M. H., 2008. Is it useful to combine measurements taken during the growing season with a dynamic model to predict the nitrogen status of winter wheat? *European Journal of Agronomy* 28, 291–300.
- Neeteson J. J., 1990. Development of nitrogen fertilizer recommendations for arable crops in the Netherlands in relation to nitrate leaching. *Fertilizer research* 26 (1–3), 291–298.
- Neumann S., Paveley N.D., Beed F.D. & Sylvester-Bradley R. 2004. Nitrogen per unit leaf area affects the upper asymptote of Puccinia striiformis f.sp. tritici epidemics in winter wheat. *Plant Pathology* 53 (6), 725–732.

- Olesen J. E., Mortesen J. V., Jorgensen L. N. & Andersen M. N., 2000. Irrigation strategy, nitrogen application and fungicide control in winter wheat on a sandy soil. I. Yield yield components and nitrogen uptake. *Journal of Agricultural Science* 134 (1), 1–11.
- Olesen J.E., Jorgensen L.N., Petersen J. & Mortensen J.V., 2003. Effects of rate and timing of nitrogen fertilizer on disease control by fungicides in winter wheat. 1. Grain yield and foliar disease control. *Journal of Agricultural Science* 140 (1), 1–13.
- Pavlista A.D., 2005. Early-Season Applications of Sulfur Fertilizers Increase Potato Yield and Reduce Tuber Defects. *Agronomy Journal* 97, 599–603.
- Pellet D., 2000a. Dosage du nitrate dans les tiges pour affiner le pilotage de la fumure azotée du blé d'automne. I. La méthode Jubil est-elle adaptée aux variétés cultivées en Suisse? *Revue suisse d'Agriculture* 32 (3), 103–108.
- Pellet D., 2000b. Dosage du nitrate dans les tiges pour affiner le pilotage de la fumure azotée du blé d'automne. II. La méthode Jubil comme complément à celle des normes corrigées. *Revue suisse d'Agriculture* 32 (4), 165–171.
- Pellet D, Mercier E, Lavanchy J, Pfeiffer H, 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 (4), 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.
- Pellet D. & Grosjean Y., 2007. Fumure azotée du tournesol: intérêt de la méthode Héliotest pour la Suisse. *Revue suisse d'Agriculture* 39 (1), 5–9.
- Reust W., Hebeisen T. & Ballmer T., 2006. Fumure azotée et nouvelles variétés de pommes de terre cultivées en Suisse. *Revue suisse d'Agriculture* 38 (6), 309–313.
- Richner W., Flisch R., Sinaj S. & Charles R., 2010. Détermination des normes de fumure azotée pour les grandes cultures. *Recherche Agronomique Suisse* 1 (11–12), 410–415.
- Ryckmans D., 2009. Quelques rappels sur la fumure phosphopotassique. In: *Fiwap info*, février 2009, 8.
- Sattelmacher B., Kuene R., Malagampa P. & Moreno U., 1990. Evaluation of tuber bearing *Solanum* species belonging to different ploidy levels for its yielding potential at low soil fertility. *Plant and Soil* 129, 227–233.
- Schvartz, C., Decroux J. & Muller J. C., 2005. Guide de la fertilisation raisonnée: grandes cultures et prairies. Comité français d'étude et de développement de la fertilisation raisonnée. Editions France Agricole, Paris, France. 414 p.
- Schwaerzel R., Torche J.-M., Ballmer T., Musa T. & Dupuis B., 2014. Liste suisse des variétés de pommes de terre 2015. *Recherche Agronomique Suisse* 5, 11–12.
- SCPA, 1995. Les courbes d'absorption d'éléments minéraux. Ministère de l'agriculture, France.
- Sinaj S., Richner W., Flisch R. & Charles R., 2009. Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages. *Revue suisse d'Agriculture* 41 (1), 98.
- Sinaj S., Maltas A., Dupuis B. & Pellet D., 2014. Response of two potato cultivars to nitrogen fertilization in Switzerland. In: 19th Triennial Conference of the European Association for Potato Research, 2014. Editions EAPR, Brussels, Belgium.
- Smiley R. W. & Cook R. J., 1973. Relationship between take-all of wheat and rhizosphere pH in soils fertilized with ammonium vs. nitrate-nitrogen. *Phytopathology* 63, 882–890.
- Söchting H. P. & Verreet J.-A., 2004. Effects of different cultivation systems (soil management, nitrogen fertilization) on the epidemics of fungal diseases in oilseed rape (*Brassica napus* L. var. napus). *Journal of Plant Diseases and Protection* 111 (1), 1–29.
- Sonderegger O. & Scheuner S., 2014. Bekenntnis zur Qualitätsstrategie – Getreidebranche einigt sich auf Proteinbezahlung. SwissGranum, Berne, Suisse. Accès: <http://www.swissgranum.ch>.
- Swiss granum, 2015. Produktionsflächen / Surfaces de production. Accès: [https://www.swissgranum.ch/files/2015-12-18\\_anbauflaechen.pdf](https://www.swissgranum.ch/files/2015-12-18_anbauflaechen.pdf) [10. 5. 2017].
- Swisspatat, 2015. Données statistiques 2014 sur la production et la mise en valeur des pommes de terre. Accès: <http://www.kartoffel.ch>.
- Tindall T. A., Westermann D. T., Stark J. C., Ojala J. C. & Kleinkopf G. E., 1993. Phosphorus Nutrition of Potatoes. Current Information Series No. 903, University of Idaho, USA.
- Trehan S. P. & Sharma R. C., 2002. Potassium uptake efficiency of young plants of three potato cultivars as related to root and shoot parameters. *Communication in Soil Science and Plant Analysis* 33 (11–12), 1813–1823.
- UNIFA, 2015. Les outils de raisonnement de l'apport de soufre. Accès: <http://fertilisation-edu.fr/le-raisonnement-de-la-fertilisation/azote-et-soufre/les-outils-de-raisonnement.html>.
- USP, 2014. Chapitre 2: Production végétale. In: *Statistiques et évaluations concernant l'agriculture et l'alimentation 2013*, Agrisat, Suisse. Accès: <http://www.sbv-usp.ch/>
- Vulliod P., 2005. Rotation des cultures en terres assolées. *Revue suisse d'Agriculture* 37 (4), 1–4.
- Wendling M., Büchi L., Amossé C., Sinaj S., Walter A. & Charles R., 2016. Influence of root and leaf traits on the uptake of nutrients in cover crops. *Plant Soil*, 1–16.
- Westermann D. T. & Kleinkopf G. E., 1985. Nitrogen requirements of potatoes. *Agronomy Journal* 77, 616–621.
- Yara, 2008. N-Tester®, le pilotage de l'azote tout simplement. Brochure disponible sur [www.yara.fr](http://www.yara.fr), 12 p.

## 7. Liste des tableaux

Tableau 1. Effet de la fertilisation N sur les caractéristiques du blé et rôle de ces critères selon sa destination. ....	8/4
Tableau 2. Influence de la fertilisation N, P et K sur la qualité des tubercules de la pomme de terre. ....	8/6
Tableau 3. Effets de la fertilisation N et S sur la richesse en huile et la concentration en glucosinolates du colza. ....	8/8
Tableau 4. Influence de carences ou d'excès de N, K, Mg et S sur les maladies du maïs. ....	8/11
Tableau 5. Influence de la fertilisation N, P et K sur la qualité de la betterave à sucre. ....	8/12
Tableau 6. Prélèvements en éléments nutritifs pour un choix de cultures intermédiaires. ....	8/14
Tableau 7. Estimation du N libéré ou bloqué pour la culture suivant une culture intermédiaire en fonction des espèces et de leur croissance. ....	8/14
Tableau 8. Récapitulatif des effets, atouts et limites des différents types de cultures intermédiaires. ....	8/15
Tableau 9. Rendements de référence, prélèvements et normes de fertilisation en N, P, K, Mg pour les grandes cultures. ....	8/16
Tableau 10. Correction de la norme de fertilisation N en fonction de la variété de pomme de terre. ....	8/20
Tableau 11. Correction de la fertilisation N lorsque le rendement cible diffère du rendement moyen de référence. ....	8/23
Tableau 12. Correction de la fertilisation N en fonction du potentiel de minéralisation de la MO. ....	8/23
Tableau 13. Correction de la fertilisation N en fonction du précédent cultural. ....	8/24
Tableau 14. Correction de la fertilisation N en fonction des arrière-effets des apports d'engrais organiques. ....	8/24
Tableau 15. Correction de la fertilisation N en fonction des pluies d'hiver et de printemps. ....	8/25
Tableau 16. Libération de N complémentaire suite à des sarclages répétés après la levée de la culture, selon le taux de matière organique du sol. ....	8/25
Tableau 17. Correction de la fertilisation N en fonction des conditions météorologiques (humidité et température) printanières et de l'état du sol. ....	8/25
Tableau 18. Stade et profondeur de prélèvement des échantillons pour la détermination du $N_{\min}$ . ....	8/26
Tableau 19. Fertilisation N des céréales basée sur la teneur en $N_{\min}$ du sol. ....	8/26
Tableau 20. Fertilisation N des cultures sarclées basée sur les teneurs en $N_{\min}$ du sol. ....	8/27
Tableau 21. Coefficients de correction de la norme P, K, Mg selon la culture. ....	8/29
Tableau 22. Paramètres permettant d'évaluer le risque de carence en S et d'estimer les besoins en fertilisation soufrée des cultures. ....	8/30
Tableau 23. Besoins en soufre de quelques cultures et recommandation de fertilisation soufrée. ....	8/31
Tableau 24. Apports de B et de Mn basés sur les résultats d'analyse de sol, le type de sol et la culture. ....	8/31
Tableau 25. Exemple d'un plan de fumure. ....	8/33
Tableau 26. Fractionnement, stade d'application optimal et dose maximale admissible pour les différents apports de N selon la pluviométrie et les conditions pédologiques. ....	8/35
Tableau 27. Possibilités d'impasse sur la fertilisation minérale P, K et Mg en fonction de la richesse du sol et de la profondeur utile. ....	8/38
<hr/>	
Annexe. Teneurs en éléments nutritifs des produits végétaux. ....	8/43

## 8. Liste des figures

Figure 1. Courbe d'absorption des éléments nutritifs (N, P, K, et S) par la culture de blé (plante entière) sur la base d'un rendement de 60 dt/ha et en fonction du développement physiologique de la plante. ....	8/4
Figure 2. Courbe d'absorption des éléments nutritifs (N, P, K, S, Mg) par la pomme de terre (variété José – rendement 45t/ha) en fonction du développement physiologique de la plante. ....	8/6
Figure 3. Courbe d'absorption des éléments nutritifs (N, P, K, Mg) par le colza en fonction du développement physiologique de la plante. ....	8/8
Figure 4. Somme des éléments nutritifs absorbés par le maïs jusqu'au stade de développement 89. ....	8/11
Figure 5. Gestion du N en interculture de fin juillet à fin mars. CIPAN : Culture intermédiaire piège à nitrates. ....	8/14
Figure 6. Cycle de l'azote à l'échelle parcellaire. ....	8/21
Figure 7. Présentation schématique de la méthode des normes corrigées. ....	8/23
Figure 8. Démarche pour calculer la norme de fertilisation en P, K et Mg. ....	8/28
Figure 9. Courbes d'absorption du N par les variétés Bintje et Laura pour un apport de 120 kg N/ha. ....	8/36



## 9. Annexe

Teneurs en éléments nutritifs des produits végétaux															
Culture	Rendement du produit récolté dt/ha	Produit	Teneur en MS %	Teneurs en éléments nutritifs (kg/t de matière fraîche)											
				N			P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )			K (K <sub>2</sub> O)			Mg		
				inf.	sup.	val.	inf.	sup.	val.	inf.	sup.	val.	inf.	sup.	val.
Blé automne (biscuitier et panifiable)	60	grain	85	15,0	25,0	20,2	3,3 (7,5)	4,4 (10,0)	3,6 (8,2)	2,9 (3,5)	4,6 (5,5)	3,6 (4,3)	0,8	1,2	1,2
	70	paille	85	3,0	7,0	3,1	0,4 (1,0)	1,3 (3,0)	0,8 (1,9)	5,8 (7,0)	12,5 (15,0)	8,9 (10,7)	0,6	1,0	0,7
Blé fourrager d'automne	75	grain	85	15,0	25,0	17,3	3,3 (7,5)	4,4 (10,0)	3,6 (8,2)	2,9 (3,5)	4,6 (5,5)	3,6 (4,3)	0,8	1,2	1,2
	75	paille	85	2,8	7,0	2,8	0,4 (1,0)	1,3 (3,0)	0,8 (1,9)	5,8 (7,0)	12,5 (15,0)	8,9 (10,7)	0,6	1,0	0,7
Blé de printemps	50	grain	85	18,0	26,0	20,2	3,1 (7,0)	4,3 (9,8)	3,6 (8,2)	2,5 (3,0)	4,2 (5,0)	3,6 (4,3)	1,0	1,4	1,2
	60	paille	85	3,0	7,0	3,1	0,5 (1,2)	1,0 (2,2)	0,8 (1,9)	6,6 (8,0)	11,6 (14,0)	8,9 (10,7)	0,3	0,7	0,7
Orge d'automne	60	grain	85	13,0	17,0	14,8	3,5 (8,0)	4,4 (10,0)	3,7 (8,4)	2,7 (4,5)	6,2 (7,5)	4,5 (5,4)	0,8	1,2	1,1
	60	paille	85	3,0	6,0	4,3	0,8 (1,8)	1,2 (2,8)	1,0 (2,2)	10,0 (12,0)	19,9 (24,0)	13,3 (16,0)	0,2	0,6	0,6
Orge de printemps	55	grain	85	10,0	16,0	14,8	3,1 (7,0)	3,9 (9,0)	3,7 (8,4)	4,2 (5,0)	5,8 (7,0)	4,5 (5,4)	0,9	1,3	1,1
	55	paille	85	3,0	7,0	4,3	0,8 (1,8)	1,2 (2,6)	1,0 (2,2)	13,3 (16,0)	19,9 (24,0)	13,3 (16,0)	0,2	0,6	0,6
Avoine d'automne	55	grain	85	13,0	19,0	16,0	3,1 (7,0)	3,9 (9,0)	3,5 (8,0)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,2 (5,0)	0,9	1,3	1,0
	70	paille	85	3,0	7,0	5,0	0,9 (2,3)	1,7 (3,1)	1,2 (2,7)	14,9 (18,0)	19,9 (24,0)	17,4 (21,0)	0,6	1,2	0,9
Avoine de printemps	55	grain	85	13,0	19,0	16,5	3,1 (7,0)	3,9 (9,0)	3,5 (8,0)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,2 (5,0)	0,9	1,3	1,0
	70	paille	85	3,0	7,0	4,1	1,0 (2,3)	1,4 (3,1)	1,2 (2,7)	14,9 (18,0)	19,9 (24,0)	17,4 (21,0)	0,6	1,2	0,9
Seigle d'automne	55	grain	85	13,0	18,0	13,0	3,1 (7,0)	3,9 (9,0)	3,5 (8,0)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,2 (5,0)	0,9	1,3	1,1
	70	paille	85	3,0	7,0	3,0	0,9 (2,0)	1,3 (3,0)	0,9 (2,0)	8,3 (10,0)	11,6 (14,0)	10,0 (12,0)	0,8	1,2	1,0
Seigle d'automne hybride	65	grain	85	13,0	18,0	13,0	3,1 (7,0)	3,9 (9,0)	3,5 (8,0)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,2 (5,0)	0,9	1,3	1,1
	75	paille	85	3,0	7,0	3,0	0,9 (2,0)	1,3 (3,0)	0,9 (2,0)	8,3 (10,0)	11,6 (14,0)	10,0 (12,0)	0,8	1,2	1,0
Epeautre	45	grain	85	14,0	18,0	16,0	3,1 (7,0)	3,9 (9,0)	3,5 (8,0)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,2 (5,0)	0,9	1,3	1,1
	70	paille	85	3,0	7,0	5,0	0,9 (2,0)	1,3 (3,0)	1,1 (2,5)	8,3 (10,0)	11,6 (14,0)	10,0 (12,0)	0,8	1,2	1,0
Triticale d'automne	60	grain	85	15,0	20,0	16,0	3,1 (7,0)	4,8 (11,0)	3,1 (7,2)	4,1 (4,9)	5,8 (7,0)	4,1 (4,9)	0,8	1,2	0,9
	75	paille	85	3,3	10,0	3,3	0,6 (1,4)	1,5 (3,5)	0,6 (1,4)	8,3 (10,0)	14,9 (18,0)	14,9 (18,0)	0,6	0,9	0,6
Triticale de printemps	55	grain	85	15,0	20,0	16,0	3,1 (7,0)	4,8 (11,0)	3,1 (7,2)	4,1 (4,9)	5,8 (7,0)	4,1 (4,9)	0,8	1,2	0,9
	70	paille	85	3,3	10,0	3,3	0,6 (1,4)	1,5 (3,5)	0,6 (1,4)	8,3 (10,0)	14,9 (18,0)	14,9 (18,0)	0,6	0,9	0,6

Culture	Rendement du produit récolté dt/ha	Produit	Teneur en MS %	Teneurs en éléments nutritifs (kg/t de matière fraîche)											
				N			P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )			K (K <sub>2</sub> O)			Mg		
				inf.	sup.	val.	inf.	sup.	val.	inf.	sup.	val.	inf.	sup.	val.
Amidonner, engrain	25	grain	85	17,0	27,0	22,0	2,6 (6,0)	4,4 (10,0)	3,5 (8,0)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,2 (5,0)	0,8	2,0	1,4
	45	paille	85	3,0	5,0	4,0	0,9 (2,0)	1,7 (4,0)	1,3 (3,0)	5,8 (7,0)	9,1 (11,0)	7,5 (9,0)	0,4	0,8	0,6
Millet	35	grain	85	15,2	18,4	16,6	2,4 (5,5)	3,2 (7,3)	2,8 (6,4)	1,8 (2,2)	2,7 (3,3)	2,4 (2,9)	0,9	1,4	1,2
	45	paille	85	9,3	11,6	10,7	1,3 (3,0)	3,3 (7,6)	2,4 (5,5)	12,6 (15,2)	25,3 (30,5)	18,8 (22,7)	1,8	2,7	2,4
Maïs grain	100	grain	85	11,0	15,0	13,0	1,7 (4,0)	3,5 (8,0)	2,6 (5,9)	3,3 (4,0)	4,6 (5,6)	3,3 (4,0)	0,6	1,4	0,9
	110	paille	85	4,0	8,0	7,3	1,0 (2,4)	1,9 (4,4)	1,1 (2,4)	11,6 (14,0)	24,9 (30,0)	14,5 (17,4)	0,7	1,9	1,3
Maïs d'ensilage <sup>1</sup>	185	plante entière	100	10,0	15,0	11,8	1,7 (4,0)	3,1 (7,0)	2,1 (4,8)	8,3 (10,0)	17,4 (21,0)	10,8 (13,0)	0,9	1,5	1,3
Maïs vert <sup>1</sup>	60	plante entière	100	14,0	24,0	19,0	2,4 (5,5)	3,3 (7,5)	2,8 (6,5)	18,3 (22,0)	26,6 (32,0)	22,4 (27,0)	0,8	1,2	1,0
Pomme de terre consommation et industrielle	450	tubercules	22	2,2	3,8	3,0	0,4 (1,0)	0,9 (2,0)	0,6 (1,3)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,5 (5,4)	0,2	0,2	0,2
	200	fanes	14	0,9	1,9	1,4	0,1 (0,3)	0,3 (0,7)	0,2 (0,5)	3,3 (4,0)	7,5 (9,0)	5,4 (6,5)	0,2	0,5	0,4
Pomme de terre primeur	300	tubercules	18	1,7	2,9	2,3	0,4 (1,0)	0,9 (2,0)	0,7 (1,5)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,2 (5,0)	0,2	0,2	0,2
	200	fanes	8	2,5	4,1	3,3	0,2 (0,5)	0,4 (0,9)	0,3 (0,7)	3,3 (4,0)	8,3 (10,0)	5,8 (7,0)	0,3	0,8	0,6
Pomme de terre plant	250	tubercules	18	1,7	2,9	2,3	0,4 (1,0)	0,9 (2,0)	0,7 (1,5)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,2 (5,0)	0,2	0,2	0,2
	200	fanes	8	2,5	4,1	3,3	0,2 (0,5)	0,4 (0,9)	0,3 (0,7)	3,3 (4,0)	8,3 (10,0)	5,8 (7,0)	0,3	0,8	0,6
Betterave sucrière	900	racines	22	1,2	2,5	1,2	0,3 (0,6)	0,4 (1,0)	0,3 (0,7)	1,7 (2,0)	3,3 (4,0)	1,7 (2,0)	0,2	0,4	0,3
	475	feuilles et collets	15	2,0	4,0	3,3	0,3 (0,6)	0,9 (2,0)	0,3 (0,7)	4,2 (5,0)	5,8 (7,0)	5,2 (6,3)	0,4	1,0	0,9
Betterave fourragère	175	racines <sup>1</sup>	100	9,0	13,0	11,0	1,7 (4,0)	2,6 (6,0)	2,2 (5,0)	12,5 (15,0)	17,4 (21,0)	14,9 (18,0)	1,1	1,5	1,3
	400	feuilles	15	2,0	4,5	3,5	0,3 (0,6)	0,4 (1,0)	0,3 (0,8)	5,0 (6,0)	6,6 (8,0)	5,8 (7,0)	0,5	1,3	0,9
Colza d'automne	35	principal	90	26,0	34,0	26,1	5,7 (13,0)	8,3 (19,0)	6,4 (14,6)	6,6 (8,0)	9,1 (11,0)	7,1 (8,5)	2,0	3,2	2,4
	90	secondaire	85	5,0	10,0	7,0	0,9 (2,0)	1,7 (4,0)	0,9 (2,0)	10,3 (12,4)	14,9 (18,0)	10,3 (12,4)	0,6	2,0	0,6
Colza de printemps	25	principal	90	26,0	34,0	26,1	5,7 (13,0)	8,3 (19,0)	6,4 (14,6)	6,6 (8,0)	9,1 (11,0)	7,1 (8,5)	2,0	3,2	2,6
	45	secondaire	85	5,0	10,0	7,0	0,9 (2,0)	1,7 (4,0)	0,9 (2,0)	10,3 (12,4)	14,9 (18,0)	10,3 (12,4)	1,0	2,0	1,5
Tournesol	30	grain	85	28,0	35,0	31,5	3,9 (9,0)	5,7 (13,0)	4,8 (11,0)	6,0 (7,2)	8,0 (9,6)	7,0 (8,4)	2,3	3,7	3,0
	60	paille	60	8,0	10,0	9,0	1,1 (2,5)	1,2 (2,8)	1,2 (2,7)	45,7 (55,0)	56,4 (68,0)	51,0 (61,5)	6,5	8,5	7,5
Chanvre oléagineux	13	grain	90	40,0	52,0	46,0	8,7 (20,0)	13,1 (30,0)	10,9 (25,0)	5,8 (7,0)	12,5 (15,0)	9,1 (11,0)	4,1	6,7	5,4
	60	paille	85	7,0	11,0	9,0	1,3 (3,0)	2,2 (5,0)	1,7 (4,0)	8,3 (10,0)	14,9 (18,0)	11,6 (14,0)	1,0	2,0	1,5

<sup>1</sup> Rendement et teneurs se référant à la matière sèche (MS).

Culture	Rendement du produit récolté dt/ha	Produit	Teneur en MS %	Teneurs en éléments nutritifs (kg/t de matière fraîche)											
				N			P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )			K (K <sub>2</sub> O)			Mg		
				inf.	sup.	val.	inf.	sup.	val.	inf.	sup.	val.	inf.	sup.	val.
Chanvre fibre	100	principal	85	2,0	4,0	3,0	0,9 (2,0)	1,7 (4,0)	1,3 (3,0)	5,8 (7,0)	9,1 (11,0)	7,5 (9,0)	0,3	0,7	0,5
	40	secondaire	90	23,0	32,0	27,5	5,2 (12,0)	7,8 (18,0)	6,5 (15,0)	16,6 (20,0)	29,1 (35,0)	22,8 (27,5)	3,0	7,0	5,0
Lin oléagineux	20	grain	90	45,0	64,0	54,5	3,9 (9,0)	6,5 (15,0)	5,2 (12,0)	5,8 (7,0)	10,0 (12,0)	7,9 (9,5)	0,3	0,7	0,5
	25	paille	85	4,0	8,0	6,0	1,7 (4,0)	2,6 (6,0)	2,2 (5,0)	10,8 (13,0)	19,1 (23,0)	14,9 (18,0)	0,5	1,2	0,9
Lin fibre	45	grain	85	8,0	12,0	10,0	2,6 (6,0)	3,5 (8,0)	3,1 (7,0)	12,5 (15,0)	20,8 (25,0)	16,6 (20,0)	1,0	3,0	2,0
	15	paille	90	45,0	64,0	54,5	3,9 (9,0)	6,5 (15,0)	5,2 (12,0)	5,8 (7,0)	10,0 (12,0)	7,9 (9,5)	0,3	0,7	0,5
Roseau de Chine <sup>1</sup>	200	plante entière	100	1,8	2,4	2,1	0,3 (0,8)	0,5 (1,1)	0,4 (1,0)	3,7 (4,5)	5,6 (6,7)	4,6 (5,6)	0,2	0,3	0,3
Kenaf <sup>1</sup>	50	plante entière	100	15,0	25,0	20,0	3,9 (9,0)	6,5 (15,0)	5,2 (12,0)	10,0 (12,0)	16,6 (20,0)	13,3 (16,0)	1,0	3,0	2,0
Pois protéagineux	40	grain	85	30,0	40,0	35,0	3,5 (8,0)	5,2 (12,0)	4,4 (10,0)	8,3 (10,0)	11,6 (14,0)	10,0 (12,0)	0,9	1,5	1,2
	50	paille	85	16,0	24,0	20,0	2,2 (5,0)	4,4 (10,0)	3,3 (7,5)	10,8 (13,0)	15,8 (19,0)	13,3 (16,0)	1,8	2,6	2,2
Féverole	40	grain	85	30,0	50,0	40,0	4,8 (11,0)	7,4 (17,0)	6,1 (14,0)	8,3 (10,0)	14,9 (18,0)	11,6 (14,0)	2,0	3,0	2,5
	45	paille	85	20,0	40,0	30,0	1,3 (3,0)	1,7 (4,0)	1,5 (3,5)	12,5 (15,0)	20,8 (25,0)	16,6 (20,0)	2,8	3,8	3,3
Soja	30	grain	85	45,0	75,0	60,0	4,4 (10,0)	7,8 (18,0)	5,1 (11,7)	12,5 (15,0)	19,1 (23,0)	16,0 (19,3)	2,0	3,0	2,0
	30	paille	85	25,0	45,0	35,0	4,4 (10,0)	6,5 (15,0)	5,1 (11,7)	16,6 (20,0)	33,2 (40,0)	17,8 (21,4)	2,9	8,0	2,9
Lupin doux	30	grain	88	45,0	65,0	55,0	3,5 (8,0)	5,2 (12,0)	4,4 (10,0)	9,1 (11,0)	13,3 (16,0)	11,2 (13,5)	1,6	2,4	2,0
	30	paille	85	25,0	45,0	35,0	1,3 (3,0)	2,2 (5,0)	1,7 (4,0)	12,5 (15,0)	20,8 (25,0)	16,6 (20,0)	3,0	5,0	4,0
Engrais vert <sup>1</sup> (légumineuse)	35	plante entière	100	34,1	49,4	43,6	3,0 (6,9)	5,8 (13,3)	4,5 (10,3)	22,8 (27,5)	41,2 (49,6)	29,1 (35,1)	1,9	3,4	2,7
Engrais vert <sup>1</sup> (non légumineuse)	35	plante entière	100	10,6	38,6	24,2	2,7 (6,2)	10,2 (23,4)	3,9 (8,9)	16,1 (19,4)	64,8 (78,1)	40,9 (49,3)	1,1	6,1	2,2
Dérobées <sup>1</sup> (par utilisation)	25	plante entière	100	24,0	32,0	28,0	3,5 (8,0)	4,8 (11,0)	4,1 (9,5)	20,8 (25,0)	37,4 (45,0)	29,1 (35,0)	2,0	3,0	2,5
Tabac Burley <sup>1</sup>	25	feuilles	100	25,0	35,0	30,0	2,8 (6,5)	3,5 (8,0)	3,2 (7,3)	33,2 (40,0)	49,8 (60,0)	41,5 (50,0)	2,3	3,3	2,8
	30	troncs	100	20,0	26,0	23,0	2,8 (6,5)	3,5 (8,0)	3,2 (7,3)	29,1 (35,0)	45,7 (55,0)	37,4 (45,0)	1,5	2,5	2,0
Tabac Virginie <sup>1</sup>	25	feuilles	100	20,0	30,0	25,0	2,2 (5,0)	2,6 (6,0)	2,4 (5,5)	33,2 (40,0)	45,7 (55,0)	39,4 (47,5)	1,5	2,5	2,0
	25	troncs	100	8,0	12,0	10,0	3,3 (7,5)	4,1 (9,5)	3,7 (8,5)	33,2 (40,0)	49,8 (60,0)	41,5 (50,0)	3,0	5,0	4,0
Riz	60	grains		9,0	13,0	11,0	2,6 (4,0)	3,5 (8,0)	3,0 (6,0)	3,3 (4,0)	5,8 (7,0)	4,6 (5,5)	0,6	1,2	0,9
	60	paille		6,0	7,0	6,5	0,9 (2,0)	1,7 (4,0)	1,3 (3,0)	10,8 (13,0)	23,2 (28,0)	17,0 (20,5)	1,2	2,4	1,8

<sup>1</sup> Rendement et teneurs se référant à la matière sèche (MS).





## 9/ Fertilisation des herbages

Olivier Huguenin-Elie<sup>1</sup>, Eric Mosimann<sup>2</sup>, Patrick Schlegel<sup>3</sup>,  
Andreas Lüscher<sup>1</sup>, Willy Kessler<sup>1</sup> et Bernard Jeangros<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Agroscope, 8046 Zurich, Suisse

<sup>2</sup> Agroscope, 1260 Nyon, Suisse

<sup>3</sup> Agroscope, 1725 Posieux, Suisse

Renseignements: [olivier.huguenin@agroscope.admin.ch](mailto:olivier.huguenin@agroscope.admin.ch)

## Table des matières

1. Introduction .....	9/3
2. Principes de bases .....	9/3
3. Rendements des prairies et des pâturages .....	9/3
4. Teneurs en macro-éléments des herbages .....	9/5
5. Prélèvements en éléments nutritifs .....	9/7
6. Recommandations de fertilisation .....	9/7
6.1 Fertilisation azotée .....	9/7
6.2 Fertilisation phosphatée .....	9/13
6.3 Fertilisation potassique .....	9/13
6.4 Fertilisation magnésienne .....	9/14
6.5 Fertilisation soufrée .....	9/14
7. Diagnostic basé sur la teneur en éléments nutritifs dans le fourrage .....	9/14
8. Engrais de ferme .....	9/15
9. Restitutions au pâturage .....	9/15
10. Entretien calcique du sol .....	9/16
11. Bibliographie .....	9/17
12. Liste des tableaux .....	9/20
13. Liste des figures .....	9/20
14. Annexe .....	9/21

## 1. Introduction

Les prairies et les pâturages sont des communautés végétales formées de nombreuses espèces de valeur agronomique et écologique contrastée. La fertilisation des herbages se différencie de celle des autres cultures par le fait qu'elle doit être intégrée dans une stratégie de maintien à long terme de l'équilibre botanique souhaité. Elle a pour but de contribuer au maintien d'une végétation adaptée au milieu ainsi qu'aux objectifs de l'exploitant/e en assurant un fourrage de bonne qualité et un rendement approprié. La fertilisation influence la qualité du fourrage récolté sur les herbages principalement par l'influence qu'elle exerce sur la composition botanique. De plus, à la différence de la plupart des autres cultures, la qualité du produit récolté concerne les feuilles et les tiges des plantes. Dans ce module, le mot «herbage» se rapporte au système sol-plantes d'une prairie ou d'un pâturage, et le fourrage produit par les herbages est simplement dénommé «fourrage».

## 2. Principes de bases

- La fertilisation des prairies et des pâturages tient compte non seulement des prélèvements par les plantes et du niveau de fertilité du sol, mais aussi de la composition botanique, c'est-à-dire des besoins du type de végétation que l'on souhaite favoriser. Une prairie permanente constituée de 50 à 70 % de graminées, de 10 à 30 % de légumineuses et de 10 à 30 % d'autres plantes permet dans la plupart des cas d'obtenir un fourrage abondant et de bonne qualité. Les diverses espèces qui se développent dans une prairie ont des exigences différentes en nutriments.
- Pour favoriser et maintenir une bonne composition botanique, stable à long terme, et éviter le développement excessif d'espèces indésirables, le niveau de fertilisation doit impérativement être adapté à l'intensité d'utilisation (figure 1) et tenir compte des conditions naturelles. Lorsque les conditions naturelles sont peu favorables aux bonnes plantes fourragères (climat rude, exposition nord, sol lourd ou superficiel, parcelle peu ensoleillée, etc.), une exploitation intensive est déconseillée. Lorsque celles-ci sont bonnes, l'exploitant/e peut choisir l'une ou l'autre des quatre intensités d'exploitation. Des sols riches en éléments nutritifs ne permettent cependant pas le développement de prairies extensives riches en espèces.

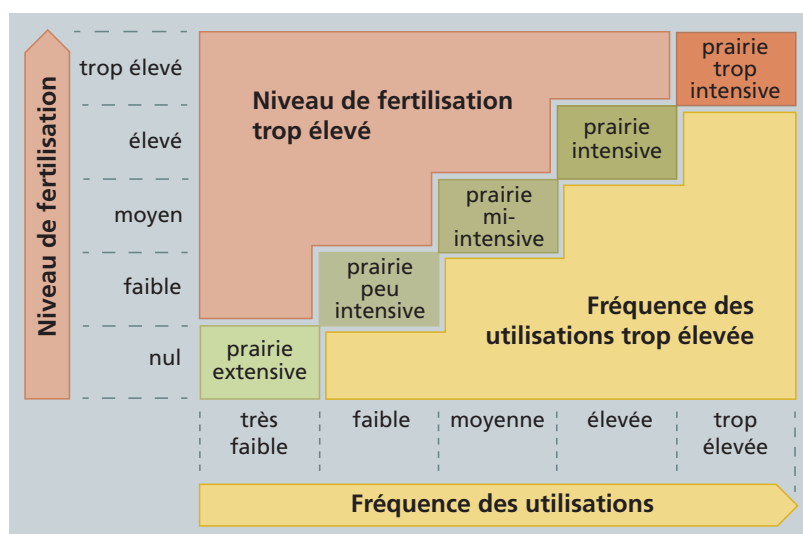


Figure 1. Types de prairies selon la fréquence des utilisations et le niveau de fertilisation correspondant (en particulier la fertilisation azotée).

- Les engrais de ferme constituent la source la plus importante d'éléments nutritifs dans les exploitations herbagères. La gestion raisonnée de la fertilisation passe donc par l'utilisation optimale des engrais de ferme à l'échelle de l'exploitation. En principe, les besoins des herbages sont en grande partie voire totalement couverts par l'épandage des engrais de ferme qui contiennent la majeure partie des éléments nutritifs exportés par la récolte des fourrages.
- Les rendements en matière sèche (MS) des herbages ne sont en général pas mesurés et donc rarement connus directement. Les valeurs prévisionnelles retenues pour le calcul du plan de fertilisation des herbages doivent donc être vérifiées en les confrontant à la consommation estimée en fourrage des animaux.
- Les erreurs commises dans l'utilisation et la fertilisation d'une prairie ou d'un pâturage ne sont généralement pas perceptibles immédiatement. Inversement, améliorer une prairie ou un pâturage permanent dégradé est toujours difficile et nécessite plusieurs années.

## 3. Rendements des prairies et des pâturages

Les rendements des herbages sont influencés par la composition botanique de la communauté végétale (p. ex. Nyfeler *et al.* 2009; Husse *et al.* 2016), par les conditions climatiques, ainsi que par les caractéristiques du sol (Mosimann 2005). Les rendements diminuent en général avec l'altitude (durée de végétation plus courte); pour les herbages fertilisés, cette diminution se situe entre 3 et 6 décitonnes (dt) de MS par 100 m d'altitude en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation ainsi que des conditions pédoclimatiques (Dietl 1986). Les équations reportées dans le tableau 1a servent au calcul de la moyenne indicative de rendement pour l'altitude concernée. Le tableau 1b donne pour exemples les moyennes indicatives pour quelques altitudes. Les données disponibles montrent qu'en dessous de 500 m d'altitude, le rendement ne varie pas significativement avec l'altitude pour les régions suisses; le rendement estimé est donc équivalent à celui calculé pour une altitude de 500 m. Les herbages couvrant des surfaces agricoles extrêmement hétérogènes du point de vue pédoclimatique, le potentiel de rendement de ceux-ci varie en conséquence très largement, même à l'intérieur d'une zone altitudinale déterminée. C'est la raison pour laquelle le tableau 1b

indique un large intervalle de rendements pour une même altitude ( $\pm 15\%$ ). L'amplitude de cet intervalle correspond à l'intervalle de prédiction de 75 % pour les régressions calculées avec le jeu de données disponibles. Lorsque les conditions sont particulièrement favorables à la croissance des herbages, il est possible d'obtenir un rendement supérieur à la moyenne indiquée, en particulier avec certaines prairies temporaires (valeurs supérieures des intervalles). Au contraire, lorsque l'ensoleillement est insuffisant (exposition nord, lisière de forêt) ou lorsque les plantes souffrent périodiquement d'un manque ou d'un excès d'eau (sol superficiel et léger, sol lourd et compacté, précipitations trop faibles ou trop importantes; Mosimann *et al.* 2013; Hoekstra *et al.* 2014), le rendement diminue (valeurs inférieures des intervalles). Dans le Jura par exemple, où le climat est plus rude que dans les Préalpes et les Alpes pour une même altitude (p. ex. Lauber *et al.* 2012), les rendements correspondent plutôt aux valeurs inférieures des intervalles indiqués dans le tableau 1b.

Il est également important de ne pas surestimer le rendement des parcelles en surestimant l'intensité d'utilisation, ceci particulièrement en altitude, où les situations permettant une utilisation intensive des herbages sont moins fréquentes qu'en plaine. La variation interannuelle est elle aussi importante. Par exemple, le coefficient de variation du rendement annuel était de 17 % autour de la moyenne durant les 30 ans de suivi du rendement d'une prairie à faner fertilisée du Jura, et de 18 % autour de la moyenne et durant les 24 ans de suivi du rendement d'une prairie des Alpes centrales (voir aussi Mosimann *et al.* 2012).

La disponibilité en eau a un effet marqué sur le rendement. La diminution de rendement provoquée par une sécheresse est de l'ordre de 5 à 15 dt MS/ha par 100 mm de déficit pluviométrique (Lazzarotto *et al.* 2010; Meisser *et al.* 2013; Mosimann *et al.* 2013). Lorsque la sécheresse est plus sévère dans les zones de basse altitude qu'en montagne, la relation entre altitude et rendement peut ainsi être effacée voir inversée. Ceci est observé régulièrement avec les parcelles d'essai d'Agroscope dans la région de Changins. Le rendement des prairies temporaires est d'environ 10 % supérieur lors de la première année principale d'utilisation par rapport aux années suivantes (Lehmann *et al.* 2001).

Les rendements des tableaux 1a et 1b ne sont donc que des valeurs indicatives correspondant aux rendements pour des situations moyennes dans les zones considérées. Il est dès lors impératif d'ajuster les niveaux de rendements à l'échelle de l'exploitation en se basant sur le bilan fourrage calculé sur plusieurs années (quantité estimée de fourrage ingérée par les animaux, moyennant correction des quantités de fourrages non issus d'herbages ainsi que des fourrages vendus et achetés).

Les rendements des pâturages indiqués dans les tableaux 1a et 1b sont inférieurs à ceux des prairies pour une altitude et une intensité d'utilisation correspondante, car la pâture occasionne généralement des pertes au champ plus importantes que la récolte du fourrage. Une conduite op-

**Tableau 1a. Relation entre l'altitude (m) et le potentiel moyen de rendement (dt MS/ha) en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation.**

Le niveau d'incertitude autour de la moyenne indiquée est élevé. En dessous de 500 m d'altitude, l'estimation du rendement correspond à la valeur calculée pour une altitude de 500 m.

Mode et intensité d'utilisation	Rendement annuel moyen (dt MS/ha) <sup>1</sup>
<b>Prairie</b>	
Intensive	159 – 0,058 x altitude
Mi-intensive	121 – 0,046 x altitude
Peu-intensive	80 – 0,032 x altitude
Extensive	38 – 0,015 x altitude
<b>Pâturage</b>	
Intensif	133 – 0,046 x altitude
Mi-intensif	101 – 0,038 x altitude
Peu-intensif	65 – 0,026 x altitude
Extensif	30 – 0,012 x altitude

<sup>1</sup> Il s'agit du rendement récolté ou ingéré par les animaux au pâturage; les pertes au champ sont prises en compte, mais pas les pertes de conservation (silo, séchoir ou tas).

timale de la pâture réduit cette différence. Pour un pâturage donné, le rendement ingéré peut être estimé de la façon suivante :

$$Rdt_{ingéré} = \frac{Charge\ instant. \times Durée\ pâture \times Ingestion\ jour.}{100}$$

où:

- *Rdt ingéré* est le rendement ingéré en dt MS/ha.
- *Charge instant.* est la charge instantanée sur le pâturage en nombre d'animaux par hectare. La charge instantanée est égale au nombre d'animaux par hectare qui pâturent en même temps sur le pâturage.
- *Durée pâture* est la durée de pâture exprimée en jours. Elle équivaut au nombre total de jours de présence des animaux sur la surface en question au cours d'une année.
- *Ingestion jour.* est l'ingestion journalière moyenne de fourrage au pâturage de la catégorie d'animal concernée en kg MS/animal/jour. L'ingestion journalière moyenne au pâturage varie selon la catégorie d'animal, la quantité de fourrage disponible sur le pâturage, l'importance de la complémentation d'autres fourrages et aliments, et le niveau de production des animaux. Les équations permettant d'estimer la capacité d'ingestion totale des bovins, ovins et caprins sont données, en fonction du niveau de production, dans l'ouvrage «Apports alimentaires recommandés pour les ruminants» (Livre vert, Agroscope 2015a). Sur une base annuelle, les quantités de référence de fourrage consommé sont indiquées dans le tableau 2 du module 4 «Propriétés et utilisation des engrais» pour l'ensemble des catégories d'animaux.



**Tableau 1b. Exemples d'estimations du rendement annuel récolté en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation ainsi que de l'altitude à l'aide des équations indiquées dans le tableau 1a.**

Mode et intensité d'utilisation Nombre d'utilisations par année <sup>1</sup>	Altitude (m)	Rendement annuel récolté (dt MS/ha)	
		Moyenne indicative	Intervalle <sup>2</sup>
<b>Prairie intensive</b>			
5–6 utilisations	≤ 500	130	111–150
5 utilisations	700	119	101–137
4 utilisations	900	107	91–123
3–4 utilisations <sup>3</sup>	1'100	96	81–110
3 utilisations <sup>3</sup>	1'300	84	71–97
<b>Prairie mi-intensive</b>			
4–5 utilisations	≤ 500	98	83–112
4 utilisations	700	88	75–102
3 utilisations	900	79	67–91
2–3 utilisations	1'100	70	59–80
2 utilisations	1'300	61	52–70
<b>Prairie peu intensive</b>			
3 utilisations	≤ 500	64	54–74
3 utilisations	700	58	49–66
2 utilisations	900	51	44–59
1–2 utilisations	1'100	45	38–52
1–2 utilisations	1'300	38	33–44
<b>Pâturage intensif (&gt; 3 UGB/ha/saison de pâture)<sup>4</sup></b>			
6–8 rotations	≤ 500	110	94–127
6–7 rotations	700	101	86–116
5–6 rotations	900	92	78–105
5 rotations <sup>3</sup>	1'100	82	70–95
4 rotations <sup>3</sup>	1'300	73	62–84
<b>Pâturage mi-intensif (2–3 UGB/ha/saison de pâture)<sup>4</sup></b>			
5–6 rotations	≤ 500	82	70–95
5 rotations	700	75	63–86
4–5 rotations	900	67	57–77
4 rotations	1'100	59	50–68
3 rotations	1'300	52	44–60
<b>Pâturage peu intensif (1–2 UGB/ha/saison de pâture)<sup>4</sup></b>			
2–4 rotations	≤ 500	52	44–60
2–4 rotations	700	47	40–54
2–3 rotations	900	42	35–48
1–3 rotations	1'100	36	31–42
1–2 rotations	1'300	31	27–36

<sup>1</sup> La dernière pâture en automne compte comme utilisation uniquement si le rendement est non négligeable (rendement ingéré > 10 dt MS/ha).

<sup>2</sup> Intervalles indiquant la forte variabilité de rendement pour une altitude donnée, provenant de la variabilité entre sites ainsi que de la variabilité interannuelle ( $\pm 15\%$ ).

<sup>3</sup> En altitude, les situations permettant une utilisation intensive des herbages sont moins fréquentes qu'en plaine et une utilisation mi-intensive est souvent plus appropriée.

<sup>4</sup> Le nombre d'unités gros bétail (UGB) par hectare et par saison de pâture permet d'évaluer l'intensité d'exploitation moyenne sur l'ensemble de la surface pâturée lorsqu'il n'y a pas ou que très peu d'affouragement complémentaire à la crèche.

## 4. Teneurs en macro-éléments des herbages

Les teneurs en macro-éléments [azote (N), phosphore (P), potassium (K), magnésium (Mg) et soufre (S)] dans les fourrages provenant d'herbages sont fonction de la composition botanique, du stade de développement de la végétation et du cycle d'utilisation. Les teneurs en macro-éléments d'un fourrage jeune sont supérieures à celles d'un fourrage récolté tardivement (Daccord *et al.* 2001; Wyss et Kessler 2002; Schlegel *et al.* 2016). Les valeurs de référence en fonction de ces facteurs sont disponibles dans la «Base suisse de données des aliments pour animaux» (Agroscope 2015b). Divers documents édités par l'ADCF et Agridea facilitent la reconnaissance des principaux types de prairie et de pâturage ainsi que des stades de développement. Le tableau 2 contient les teneurs de référence en N, P, K, Mg et S sur l'ensemble de la période de végétation. Les teneurs moyennes indiquées dans le tableau 2 ont été pondérées par la part de rendement du 1<sup>er</sup> cycle de végétation car les teneurs en P, K, Mg et S sont plus basses au 1<sup>er</sup> cycle qu'aux cycles suivants (Schlegel *et al.* 2016). Ces teneurs sont valables pour des herbages de composition botanique équilibrée (entre 50 et 70 % de graminées; Agroscope 2015a). Par rapport à ces valeurs, un fourrage riche en graminées contient 5 à 10 % de N en moins, un fourrage riche en légumineuses 10 à 25 % en plus et un fourrage riche en autres plantes 10 % en plus. Un fourrage riche en graminées contient 5 à 10 % de P en moins. Les teneurs en P d'une prairie riche en légumineuses ou en autres plantes sont comparables à celles d'une prairie équilibrée. Les teneurs en K sont aussi valables pour une prairie riche en graminées ou en autres plantes. Un fourrage riche en graminées contient 5 à 10 % de Mg en moins, un fourrage riche en autres plantes 20 à 30 % de Mg en plus.

**Tableau 2. Teneurs en macro-éléments dans les herbages de composition botanique équilibrée en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation**

(selon Agroscope 2015b, en considérant que le stade d'utilisation est retardé lorsque l'intensité d'utilisation diminue).

Mode et intensité d'utilisation	Teneurs en macro-éléments (kg/dt de matière sèche)									
	N		P <sup>1</sup>		K <sup>1</sup>		Mg		S	
	Ø <sup>2</sup>	Intervalle <sup>3</sup>	Ø <sup>2</sup>	Intervalle <sup>3</sup>	Ø <sup>2</sup>	Intervalle <sup>3</sup>	Ø <sup>2</sup>	Intervalle <sup>3</sup>	Ø <sup>2</sup>	Intervalle <sup>3</sup>
<b>Prairie</b>										
Intensive	2,5	2,1–2,9	0,36	0,31–0,42	3,0	2,5–3,4	0,19	0,16–0,23	0,19	0,15–0,23
Mi-intensive	2,2	1,8–2,6	0,33	0,28–0,39	2,7	2,3–3,1	0,17	0,14–0,21	0,17	0,13–0,21
Peu-intensive	1,8	1,4–2,2	0,28	0,23–0,34	2,1	1,7–2,6	0,15	0,12–0,19	0,13	0,09–0,17
Extensive	1,4	1,0–1,8	0,23	0,18–0,28	1,4	1,0–1,8	0,14	0,10–0,17	0,11	0,07–0,15
<b>Pâturage</b>										
Intensif	2,9	2,5–3,3	0,39	0,34–0,45	3,1	2,7–3,6	0,21	0,18–0,25	0,22	0,18–0,26
Mi-intensif	2,5	2,1–2,9	0,36	0,31–0,42	2,9	2,5–3,4	0,19	0,15–0,23	0,19	0,15–0,23
Peu-intensif	2,0	1,6–2,4	0,31	0,26–0,37	2,5	2,1–2,9	0,16	0,13–0,20	0,15	0,11–0,19
Extensif	1,6	1,2–2,0	0,27	0,22–0,33	2,0	1,6–2,4	0,15	0,11–0,18	0,13	0,09–0,17

<sup>1</sup> Les teneurs exprimées en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et en K<sub>2</sub>O sont indiquées dans l'annexe.<sup>2</sup> Valeurs moyennes entre le 1<sup>er</sup> cycle de végétation et les cycles suivants, pondérées par la part de rendement du 1<sup>er</sup> cycle.<sup>3</sup> Intervalles indiquant la fourchette de valeurs fréquemment mesurées.**Tableau 3a. Prélèvements annuels indicatifs et recommandations de fertilisation en kg de N, P, K et Mg par unité de matière sèche produite pour les herbages en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation.**

Ces recommandations de fertilisation sont valables pour les herbages permanents et temporaires de la surface agricole utile.

Mode et intensité d'utilisation	Prélèvements annuels (kg/dt MS)				Recommandations de fertilisation (kg/dt MS)			
	N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg	N <sup>1</sup>	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg
<b>Prairie<sup>2</sup></b>								
Intensive <sup>3</sup>	2,5	0,36 (0,82)	3,0 (3,6)	0,19	1,1–1,3	0,36 (0,82)	2,2 (2,7)	0,25
Mi-intensive <sup>3</sup>	2,2	0,33 (0,76)	2,7 (3,3)	0,17	0,8–1,1	0,31 (0,71)	1,9 (2,3)	0,20
Peu intensive	1,8	0,28 (0,64)	2,1 (2,5)	0,15	0,4–0,6	0,25 (0,57)	1,4 (1,7)	0,15
Extensive	1,4	0,23 (0,53)	1,4 (1,7)	0,14	0	0	0	0
<b>Pâturage<sup>4</sup></b>								
Intensif <sup>5,6</sup>	2,9	0,39 (0,89)	3,1 (3,7)	0,21	1,1–1,3	0,24 \ 0,16 (0,55 \ 0,37)	0,93 \ 0,25 (1,12 \ 0,30)	0,20
Mi-intensif <sup>5</sup>	2,5	0,36 (0,82)	2,9 (3,5)	0,19	0,7–1,0	0,22 \ 0,14 (0,50 \ 0,32)	0,87 \ 0,20 (1,05 \ 0,24)	0,15
Peu intensif	2,0	0,31 (0,71)	2,5 (3,0)	0,16	0	0,17 (0,39)	0,37 (0,45)	0
Extensif	1,6	0,27 (0,62)	2,0 (2,4)	0,15	0	0	0	0

<sup>1</sup> Les apports de N aux prairies et aux pâturages sont effectués à chaque utilisation, conformément aux indications du tableau 7; la recommandation de fertilisation azotée indiquée ici ne s'applique pas aux mélanges à base de luzerne (type L) et de trèfle violet (type M) qui reçoivent nettement moins de N (voir paragraphe «fertilisation azotée»).<sup>2</sup> En cas de fauche-pâturage, les restitutions par cycle de pâture indiquées dans le tableau 5 doivent être déduites des recommandations de fertilisation pour prairie.<sup>3</sup> Pour P, K et Mg, les mélanges à base de luzerne (type L) et de trèfle violet (type M) sont fertilisés selon les recommandations pour prairie intensive, bien que la fréquence des coupes corresponde généralement à une utilisation mi-intensive.<sup>4</sup> Dans les recommandations de fertilisation pour les pâturages, les restitutions par la pâture sont déjà prises en compte.<sup>5</sup> Les recommandations de fertilisation P et K pour les pâturages mi-intensifs et intensifs sont indiquées pour une pâture avec détention à l'étable (première valeur) et sans détention à l'étable (seconde valeur). Pour Mg, les mêmes recommandations sont valables dans les deux cas.<sup>6</sup> Ces recommandations sont aussi valables pour la pâture continue sur gazon court (sans rotation).

## 5. Prélèvements en éléments nutritifs

Les prélèvements en éléments nutritifs par la récolte ou l'ingestion des fourrages sont calculés en multipliant le rendement en MS par les teneurs en éléments nutritifs dans la biomasse récoltée, indépendamment du compartiment de l'écosystème dans lequel ces éléments nutritifs ont été prélevés. Pour N notamment, les prélèvements indiqués incluent le N d'origine atmosphérique rendu disponible aux plantes par la fixation symbiotique et ne représentent donc pas uniquement de N prélevé du sol. Les prélèvements annuels donnés dans le tableau 3a sont valables pour les valeurs moyennes des teneurs en macro-éléments pour des prairies et pâturages ayant une composition botanique équilibrée. Les prélèvements effectifs peuvent néanmoins varier considérablement. Pour les pâturages, les prélèvements indiqués dans le tableau 3a correspondent à la quantité moyenne d'éléments nutritifs ingérée par les animaux.

## 6. Recommandations de fertilisation

Le tableau 3a indique les recommandations de fertilisation en N, P, K et Mg pour les prairies et les pâturages selon leur intensité d'utilisation. Les recommandations pour P, K et Mg sont valables pour les sols ayant un niveau de fertilité satisfaisant (classe de fertilité C). Les adaptations du niveau de fertilisation P, K et Mg en fonction des résultats de l'analyse de sol sont effectuées au moyen des facteurs de correction décrits dans le module 2. En tant qu'exemples, le tableau 3b donne les quantités recommandées d'apport en kilogramme par hectare pour les moyennes indicatives de rendement indiquées dans le tableau 1b pour l'altitude correspondante. Si le rendement prévisionnel s'écarte de cette moyenne indicative, la fertilisation doit être calculée à l'aide des recommandations de fertilisation par unité de matière sèche produite (kg/dt MS) indiquées dans le tableau 3a, multipliées par rendement prévisionnel.

La relation entre le prélèvement et la recommandation de fertilisation varie selon l'intensité d'utilisation, afin de maîtriser la composition botanique et la qualité du fourrage (tableau 4; voir les paragraphes relatifs aux différents éléments nutritifs pour les explications). Pour un même rendement, une prairie utilisée fréquemment prélève plus d'éléments nutritifs qu'une prairie utilisée de façon moins intensive. Les teneurs en éléments nutritifs d'un fourrage jeune sont en effet supérieures à celles d'un fourrage récolté tardivement. En conséquence, les recommandations de fertilisation par unité de biomasse récoltée augmentent avec l'intensité d'utilisation. Ainsi, le choix objectif du niveau d'intensité d'utilisation en fonction de la fréquence des utilisations est essentiel au calcul d'une fumure adéquate. Les recommandations de fertilisation du tableau 3a sont identiques pour les herbages permanents et temporaires. Les particularités pour les mélanges à base de luzerne ou de trèfle violet sont décrites dans les notes accompagnant ce tableau. Pour les prairies de fauche occasionnellement pâturées, les restitutions par cycle de pâture indiquées dans le tableau 5

doivent être déduites des recommandations de fertilisation pour prairie.

Dans une prairie ou un pâturage, l'excès de fertilisation provoque le développement d'une flore nitrophile au détriment des autres espèces, en particulier des légumineuses (Jeangros 1993; figure 4a). Les prairies utilisées de manière extensive et constituées d'une communauté végétale correspondante (p. ex. Mesobromion) ne doivent pas être fertilisées. La conservation de la biodiversité floristique est fortement compromise par une fertilité élevée du sol qui augmente la dominance de quelques espèces productives (Humbert *et al.* 2015).

Davantage d'informations concernant les recommandations de fertilisation sont données dans les paragraphes relatifs aux différents éléments nutritifs. Les recommandations de fertilisation pour les mélanges graminées-légumineuses en culture dérobée, les semis d'août de prairies temporaires, ainsi que pour la production de semences de graminées et de légumineuses fourragères sont données dans le tableau 6.



Figure 2. Les pertes au champ survenant lors du préfanage et fanage au sol, ainsi que lors de la récolte, sont prises en compte dans les valeurs de rendements présentées dans les tableaux 1a et 1b, mais pas les pertes de conservation (silo, séchoir ou tas).

### 6.1 Fertilisation azotée

De nombreux essais ont permis de préciser l'effet de la fertilisation azotée sur le rendement des prairies. L'efficacité de la fertilisation azotée varie très largement en fonction des conditions pédoclimatiques et se situe autour de 10 à 20 kg de MS supplémentaire par kg de N épandu pour les prairies intensives constituées de graminées et de trèfles (Reid 1978; Laidlaw 1980; Reid 1980; Thalmann 1985; Jeangros *et al.* 1994; Zimmermann *et al.* 1997; Elsässer 2000; Lehmann *et al.* 2001; Nevens et Rehuel 2003; Thomet *et al.*

**Tableau 3b. Exemples de la quantité recommandée d'apport en kg de N, P, K et Mg par hectare et année calculée selon les recommandations de fertilisation du tableau 3a pour les moyennes indicatives de rendement indiquées dans le tableau 1b en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation.**

Mode et intensité d'utilisation Nombre d'utilisations par année <sup>1</sup>	Altitude (m)	Rendement annuel <sup>2</sup> (dt MS/ha)	Fertilisation recommandée (kg/ha/an)					
			N	P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K	K <sub>2</sub> O	Mg
<b>Prairie intensive<sup>3</sup></b>								
5–6 utilisations	≤ 500	130	143–170	47	107	287	345	33
5 utilisations	700	119	131–154	43	98	261	315	30
4 utilisations	900	107	118–139	39	88	236	284	27
3–4 utilisations	1'100	96	105–124	34	79	210	254	24
3 utilisations	1'300	84	92–109	30	69	185	223	21
<b>Prairie mi-intensive<sup>3</sup></b>								
4–5 utilisations	≤ 500	98	78–107	30	70	185	224	20
4 utilisations	700	88	71–97	27	62	168	201	18
3 utilisations	900	79	63–87	25	56	150	181	16
2–3 utilisations	1'100	70	56–77	22	50	133	160	14
2 utilisations	1'300	61	49–67	19	43	115	140	12
<b>Prairie peu intensive<sup>3</sup></b>								
3 utilisations	≤ 500	64	26–38	16	37	90	108	10
3 utilisations	700	58	23–35	14	33	81	98	9
2 utilisations	900	51	20–31	13	29	72	86	8
1–2 utilisations	1'100	45	18–27	11	26	63	76	7
1–2 utilisations	1'300	38	15–23	10	22	54	64	6
<b>Pâturage intensif<sup>4</sup> (&gt; 3 UGB/ha/saison de pâture)<sup>5</sup></b>								
6–8 rotations	≤ 500	110	121–143	26 \ 18	60 \ 40	102 \ 28	123 \ 33	22
6–7 rotations	700	101	111–131	24 \ 16	56 \ 37	94 \ 25	113 \ 30	20
5–6 rotations	900	92	101–119	22 \ 15	51 \ 34	85 \ 23	103 \ 28	18
5 rotations	1'100	82	91–107	20 \ 13	45 \ 30	77 \ 21	92 \ 25	16
4 rotations	1'300	73	81–95	18 \ 12	40 \ 27	68 \ 18	82 \ 22	15
<b>Pâturage mi-intensif<sup>4</sup> (2–3 UGB/ha/saison de pâture)<sup>5</sup></b>								
5–6 rotations	≤ 500	82	58–82	18 \ 12	41 \ 26	71 \ 16	86 \ 20	12
5 rotations	700	75	52–75	16 \ 10	38 \ 24	65 \ 15	79 \ 18	11
4–5 rotations	900	67	47–67	15 \ 9	34 \ 21	58 \ 13	70 \ 16	10
4 rotations	1'100	59	42–59	13 \ 8	30 \ 19	51 \ 12	62 \ 14	9
3 rotations	1'300	52	36–52	11 \ 7	26 \ 17	45 \ 10	55 \ 13	8
<b>Pâturage peu intensif (1–2 UGB/ha/saison de pâture)<sup>5</sup></b>								
2–4 rotations	≤ 500	52	0	9	21	19	23	0
2–4 rotations	700	47	0	8	18	17	20	0
2–3 rotations	900	42	0	7	16	15	18	0
1–3 rotations	1'100	36	0	6	14	13	16	0
1–2 rotations	1'300	31	0	5	11	12	14	0

<sup>1</sup> La dernière pâture en automne compte comme utilisation uniquement si le rendement est non négligeable (rendement ingéré > 10 dt MS/ha).

<sup>2</sup> Les rendements utilisés pour ces exemples correspondent aux moyennes indicatives selon l'altitude indiquées dans le tableau 1b. Le rendement prévisionnel de l'herbage doit être calculé en fonction des tableaux 1a et 1b, ainsi que des explications données dans le texte pour calculer la fertilisation adaptée aux conditions spécifiques de la parcelle concernée.

<sup>3</sup> En cas de fauche-pâture, les restitutions par cycle de pâture indiquées dans le tableau 5 doivent être déduites des recommandations de fertilisation corrigées pour prairie.

<sup>4</sup> La fertilisation P et K recommandée pour les pâturages mi-intensifs et intensifs est indiquée pour une pâture avec détention à l'étable (première valeur) et sans détention à l'étable (seconde valeur).

<sup>5</sup> Le nombre d'UGB par hectare et par saison de pâture permet d'évaluer l'intensité d'exploitation moyenne sur l'ensemble de la surface pâturée lorsqu'il n'y a pas ou que très peu d'affouragement complémentaire à la crèche; selon les conditions du milieu, l'intensité d'utilisation peut varier fortement d'une parcelle à l'autre et les apports en éléments nutritifs doivent être adaptés à chaque situation.

**Tableau 4. Relation entre les prélèvements et les recommandations de fertilisation pour P, K et Mg, en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation des herbages.**

Mode et intensité d'utilisation	P	K	Mg
<b>Prairie</b>			
Intensive	1,00	0,75	1,3
Mi-intensive	0,95	0,70	1,2
Peu intensive	0,90	0,65	1,0
Extensive	-	-	-
<b>Pâturage</b>			
Intensif <sup>1</sup>	0,60 \ 0,40	0,30 \ 0,08	0,95
Mi-intensif <sup>1</sup>	0,60 \ 0,40	0,30 \ 0,07	0,80
Peu intensif	0,55	0,15	-
Extensif	-	-	-

<sup>1</sup> La première valeur pour P et K s'applique à une pâture avec détention à l'étable, la seconde à une pâture sans détention à l'étable; les différentes techniques de pâture sont définies dans le texte.

**Tableau 5. Restitutions en P, K et Mg par cycle de pâture à déduire des recommandations de fertilisation pour les prairies fertilisées occasionnellement utilisées pour la pâture (prairies de fauche-pâturage). Ces restitutions sont valables pour une pâture moyenne équivalente à environ 15 dt MS/ha (rendement ingéré)<sup>1</sup>.**

Intensité d'utilisation	Système de pâture <sup>2</sup>	Quantité à déduire par pâture <sup>3</sup> (kg/ha)				
		P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K	K <sub>2</sub> O	Mg
Intensive	Pâturage avec détention à l'étable	2,5	5,7	23	28	2,0
	Pâturage sans détention à l'étable	3,8	8,7	37	45	3,0
Mi-intensive	Pâturage avec détention à l'étable	2,0	4,5	22	27	1,5
	Pâturage sans détention à l'étable	2,8	6,5	30	36	2,0
Peu intensive	Tous les systèmes	1,7	4,0	19	23	0

<sup>1</sup> Voir chapitre 3 pour l'estimation du rendement ingéré.

<sup>2</sup> Les différents systèmes de pâture sont définis dans le texte.

<sup>3</sup> La dernière pâture d'automne compte comme utilisation uniquement si le rendement est non négligeable (rendement ingéré > 10 dt MS/ha).

2008; Lalor *et al.* 2011). Cet effet se situe entre 20 et 30 kg MS par kg d'azote pour des graminées pures (Whitehead 2000). Dans les mélanges graminées-légumineuses, la fertilisation azotée a un effet moindre sur le rendement du fait de son impact négatif sur l'activité fixatrice des légumineuses et sur leur proportion dans la communauté végétale (Boller *et al.* 2003; Nyfeler *et al.* 2009; Nyfeler *et al.* 2011; la figure 4a présente un exemple). Par contre, le rapport entre le rendement total et la quantité de fertilisation azotée est nettement supérieur en présence de légumineuses que pour des graminées pures.

Les apports recommandés de N visent surtout à maintenir l'équilibre de la composition botanique: 50 à 70 % de graminées, 10 à 30 % de légumineuses (jusqu'à 70 % dans les prairies temporaires semées avec les mélanges à base de luzerne [type L] ou de trèfle violet [type M]), 10 à 30 % d'autres plantes (jusqu'à 40 % dans les prairies de fauche en montagne). En réduisant la quantité d'azote par apport, on favorise les lé-

gumineuses; en l'augmentant, on avantage les graminées dans les zones favorables ou les dicotylédones non-légumineuses (autres plantes) à tiges grossières dans les zones défavorables (Jeangros 1993; Pauthenet *et al.* 1994; Dietl et Lehmann 2004). La prolifération des autres plantes à tiges grossières indique donc souvent une fertilisation azotée trop élevée par rapport à la fréquence d'utilisation permise par les conditions du milieu (figure 3). Dans tous les cas, il convient de ne pas dépasser 50 kg N par ha et par utilisation. En montagne, il est déconseillé de majorer les apports recommandés, car les risques de dégradation de la composition botanique sont plus élevés.

En production fourragère, la recommandation de fertilisation azotée dépasse rarement 50 % du N prélevé par le fourrage (tableau 3a) car les plantes disposent d'autres sources d'approvisionnement: fixation symbiotique par les légumineuses, minéralisation de la matière organique du sol, arrière-effet d'apports réguliers d'engrais de ferme, dépôts atmosphériques. Pour les prairies intensives, une fertilisation azotée correspondant aux recommandations permet d'atteindre l'intervalle de rendements indiqué (tableau 1b) lorsque la part de trèfle dans la prairie est de 15 % ou plus (voir fixation symbiotique d'azote). En cas d'absence de trèfle, une fertilisation azotée plus élevée serait nécessaire pour atteindre ces rendements. Cependant, plus du double des quantités de N sont nécessaires pour qu'une prairie uniquement composée de graminées atteigne un rendement équivalent à un mélange graminées-légumineuses (Whitehead 2000; Nyfeler *et al.* 2009; Husse *et al.* 2016). Pour des questions d'efficacité d'utilisation du N, il est donc fortement déconseillé d'utiliser des cultures pures de graminées fourragères pour la production de fourrage pour ruminants.

Le tableau 7 donne les recommandations de fertilisation azotée, selon le type de prairie et le mode d'utilisation (fauche ou pâture). Elles sont indiquées par utilisation et non pas par année, car les apports doivent être répartis tout au long de la période de végétation. Les quantités indiquées dans le tableau 7 sont valables pour un nombre annuel d'utilisations standard, correspondant aux indications des tableaux 1b et 3b. Pour une prairie de fauche, on admet un rendement moyen par utilisation d'environ 25 dt MS/ha. Pour un pâturage intensif, le rendement moyen par utilisation est d'environ 15 dt MS/ha. Le nombre standard d'utilisations à prendre en considération pour établir la quantité stan-

**Tableau 6. Prélèvements annuels en N, P, K et Mg et recommandations de fertilisation pour les mélanges graminées-légumineuses en culture dérobée, les semis d'août de prairies temporaires, ainsi que pour la production de semences de graminées et de légumineuses fourragères.**

Type de culture	Rendement (dt MS/ha)		Prélèvements annuels (kg/ha)				Recommandations de fertilisation <sup>3</sup> (kg/dt MS resp. kg/ha)				
	Ø <sup>1</sup>	Intervalle <sup>2</sup>	N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg	N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg	
<b>Mélanges graminées-légumineuses en culture dérobée, Semis d'août de prairies temporaire (année du semis)</b>							1,2	0,36 (0,82)	2,2 (2,7)	0,3	
Par utilisation	25	20–30	70	10 (23)	75 (90)	5	30	9 (21)	55 (66)	8	
<b>Production de semences</b>											
<b>Légumineuses pures avec production mi-intensive de fourrage</b>							0	0,31 (0,71)	1,9 (2,3)	0,25	
Par année	120	100–135	360	37 (85)	275 (331)	25	0	37 (85)	228 (275)	30	
<b>Graminées pures avec production mi-intensive de fourrage</b>							1,4–1,9	0,31 (0,71)	1,9 (2,3)	0,25	
Par année	120	100–135	230	39 (89)	266 (321)	26	170–230 <sup>4</sup>	37 (85)	228 (275)	30	
<b>Graminées pures avec production très intensive de fourrage<sup>5</sup></b>							1,7–2,0	0,35 (0,80)	2,0 (2,4)	0,25	
Par année	135	115–150	265	46 (105)	307 (370)	32	230–270 <sup>4</sup>	44 (108)	270 (325)	30	

<sup>1</sup> Moyenne indicative.

<sup>2</sup> Intervalles indiquant la variabilité de rendement provenant de la variabilité entre sites ainsi que de la variabilité interannuelle.

<sup>3</sup> Les valeurs indiquées en kg/ha correspondent aux recommandations de fertilisation pour un rendement prévisionnel égal à la moyenne indicative donnée dans le tableau.

<sup>4</sup> Fourchette correspondant à la fourchette de recommandations de fertilisation azotée en kg/dt MS pour la moyenne indicative de rendement.

<sup>5</sup> Ce système de production n'est possible que dans des conditions naturelles particulièrement favorables.



Figure 3. Dans les situations défavorables aux espèces de graminées pouvant valoriser beaucoup d'azote, une fertilisation azotée élevée favorise la prolifération de plantes nitrophiles à tiges grossières (ici *Heracleum sphondylium* L.) (photo: C. J. Stutz, Agroscope).

dard d'azote à apporter sur une année se calcule de la manière suivante:

Nombre standard d'utilisations pour prairie de fauche	=	$\frac{\text{Rendement annuel (dt MS/ha)}}{25 \text{ (dt MS/ha)}}$
Nombre standard d'utilisations pour pâturage intensif	=	$\frac{\text{Rendement annuel (dt MS/ha)}}{15 \text{ (dt MS/ha)}}$

Si le nombre effectif d'utilisations est plus élevé, le rendement par utilisation sera en général plus faible. Dans ce cas, il faut renoncer à un apport ou réduire la quantité par apport, de façon à ce que la somme des apports annuels ne dépasse pas la quantité standard (= rendement prévisionnel x recommandation de fertilisation en kg N/dt MS). Pour les pâturages intensifs, cinq apports de N répartis entre mai et septembre permettent une croissance de l'herbe plus régulière et mieux répartie sur la saison qu'une fertilisation azotée débutant au départ printanier de la végétation. La production de fourrage au printemps est ainsi légèrement réduite, celle de fin d'été et d'automne légèrement augmentée (Thomet et al. 2008). Des apports importants en automne augmentent en revanche le risque de lessivage des nitrates pendant l'hiver. Bien que les apports recommandés pour une pâture soient de 10 kg inférieurs à ceux pour une coupe, les apports annuels en N sont simi-

Tableau 7. Apports recommandés de N pour les prairies selon le type de prairie et le mode d'utilisation.

Type de prairie	Apport recommandé par coupe (kg N/ha)	Apport recommandé par pâture (kg N/ha)
<b>Prairie permanente</b>		
Intensive	30 <sup>1</sup>	15–20 <sup>1</sup>
Mi-intensive	25	15
Peu intensive	15 <sup>2</sup>	0 <sup>3</sup>
Extensive	0	0
<b>Prairie temporaire</b>		
Mélanges 1 an et 2 ans		
- à base de ray-grass d'Italie et/ou Westerwold	30 <sup>1,4</sup>	
Mélanges 3 ans et plus		
- luzerne-graminées (type L)	0 <sup>4,5,6</sup>	
- trèfle violet «Mattenklee»-graminées (type M)	0 <sup>4,5</sup>	
- graminées-trèfle blanc (type G et G*), mélanges type P	30 <sup>1,4</sup>	20 <sup>1,4</sup>
- esparcette-graminées (type E)	0	
- à base de fromental, d'avoine jaunâtre ou de brome (Mst 450, 451 et 455)	15 <sup>2,7</sup>	
<b>Culture dérobée, semis d'août de prairie temporaire</b>		
- une seule utilisation	30 <sup>4</sup>	
- plusieurs utilisations	30 <sup>4</sup>	
<b>Production de semences</b>		
- légumineuses pures	0 <sup>4</sup>	
- graminées pures; pousse pour semences	50–100 <sup>4,8</sup>	
- graminées pures; pousse affourragée	50	

<sup>1</sup> Pour les prairies intensives, permanentes ou temporaires (mélanges 1 an et 2 ans, 3 ans et plus type G ou G\*), l'apport de N par utilisation peut être légèrement majoré lorsque les conditions naturelles sont bonnes et si l'on veut favoriser les graminées au détriment des légumineuses (au maximum 50 kg N/ha par utilisation).

<sup>2</sup> Sous forme de fumier bien décomposé, éventuellement de purin très dilué après la 1<sup>re</sup> coupe; des apports réguliers de purin ou d'azote minéral sont déconseillés.

<sup>3</sup> Un apport de N par du fumier bien décomposé et appliqué pour couvrir les besoins en P et K (voir tableau 3a) est acceptable.

<sup>4</sup> Un apport de 30 kg N/ha à la levée du semis est recommandé; il correspond à l'apport pour la première utilisation; lorsqu'il s'agit d'une culture dérobée hivernante et qu'il n'y aura pas d'utilisation avant l'hiver, l'apport doit être différé au printemps suivant.

<sup>5</sup> Si la proportion de légumineuses est faible, ces mélanges peuvent être fertilisés comme les mélanges graminées-trèfle blanc.

<sup>6</sup> Un apport annuel unique de 30 kg N/ha au printemps est recommandé. Lisier et purin sont à diluer fortement avant utilisation.

<sup>7</sup> Ces mélanges ne reçoivent pas d'apport de N à la levée.

<sup>8</sup> 50 kg N/ha au début de la période de végétation et un apport complémentaire éventuel (au maximum 50 kg N/ha selon le développement des plantes) au début de la montaison des graminées.

lares dans les deux cas, le nombre d'utilisations étant plus élevé pour un pâturage.

Les nouvelles prairies temporaires reçoivent en plus un apport de 20 à 30 kg N/ha à la levée, à l'exception des mélanges à base de fromental, d'avoine jaunâtre ou de brome (mélanges standard 450, 451 et 455; Mosimann *et al.* 2012) qui ne doivent pas être fertilisés à ce moment-là.

### 6.1.1 Fixation symbiotique d'azote

Les légumineuses (*Fabaceae*), notamment les trèfles et la luzerne, constituent un atout majeur en production fourragère par leur capacité à incorporer de grandes quantités de N dans le système et à réduire cet apport lorsque le système est déjà riche en N. En effet, les racines de ces espèces forment une symbiose avec des bactéries du genre

*Rhizobium* qui leur permet d'accéder à l'azote atmosphérique (fixation symbiotique d'azote) en investissant une certaine quantité d'énergie. En situation de faible disponibilité en N dans le sol, les légumineuses couvrent ainsi jusqu'à 90 % de leurs besoins en N par la fixation (p. ex. Oberson *et al.* 2013). Ceci est aussi valable en montagne (Jacot *et al.* 2000). Lorsque la quantité de N du sol disponible pour les légumineuses augmente, celles-ci réduisent leur activité symbiotique (p. ex. Hartwig 1998). Les légumineuses jouent donc un important rôle régulateur par rapport au niveau de N dans le système. De plus, en présence de graminées compétitives, la part de légumineuses dans la communauté végétale diminue avec l'augmentation de la disponibilité en N dans le sol (p. ex. Jeangros *et al.* 1993). En conséquence, une forte fertilisation azotée réduit la quantité de N fixée par la prairie, rapidement en réduisant l'activité symbiotique des légumineuses et, sur le long

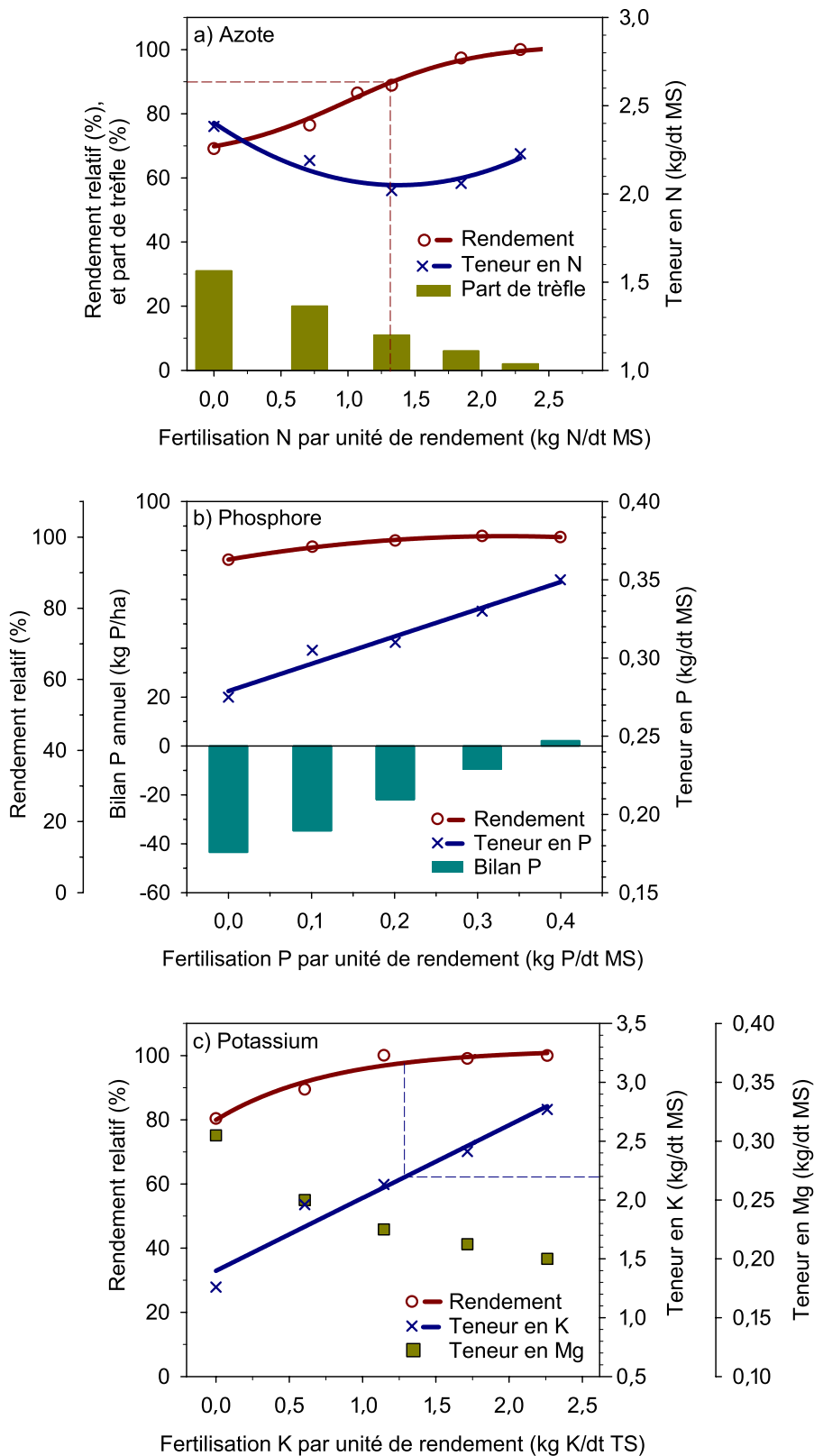


Figure 4. Illustration de l'effet de la fertilisation sur le rendement et les teneurs en N, P, K et Mg d'une prairie de fauche. Les résultats présentés ont été obtenus après 9 ans de fertilisation contrastée. Cet essai de fertilisation a été conduit sur une prairie permanente utilisée de manière intensive, dominée par du ray-grass d'Italie (*Lolium multiflorum* Lam.) et située à Hohenrain (610 m d'altitude, 1'100 mm de précipitations annuelles). Au début de l'essai, le niveau de fertilité du sol était satisfaisant pour P et K. Le rendement relatif représente le niveau de rendement par rapport au rendement maximal.

a) Effet de la fertilisation azotée sur le rendement, la teneur en N total dans le fourrage et la part de trèfles dans la prairie. Les niveaux de fertilisation azotée étaient de 0, 83, 167, 250 ou 333 kg N/ha/année (41 kg P et 232 kg K). Pour cette prairie riche en graminées, une fertilisation de 1,3 kg N/dt MS a permis d'atteindre 90 % du rendement maximal (trait interrompu vertical et horizontal) tout en préservant environ 10 % de trèfles dans la prairie et une efficacité de l'azote épandu de 30 % supérieure par rapport au niveau de fertilisation le plus élevé (en ce qui concerne l'augmentation du rendement). La teneur en N dans le fourrage ne s'élève pas avec l'augmentation de la fertilisation azotée, en raison de la diminution de la part de trèfles dans la prairie.

b) Effet de la fertilisation phosphatée sur le rendement, la teneur en P dans le fourrage et le bilan apports-prélèvements en P. Les niveaux de fertilisation phosphatée étaient de 0, 14, 28, 41, 55 kg P/ha/année (250 kg N, 232 kg K). La teneur en P dans le fourrage a augmenté de façon linéaire avec l'augmentation de la fertilisation phosphatée et le bilan en P s'est équilibré avec une fertilisation se situant entre 0,30 et 0,40 kg P/dt MS.

c) Effet de la fertilisation potassique sur le rendement, la teneur en K et la teneur en Mg dans le fourrage. Les niveaux de fertilisation potassique étaient de 0, 77, 155, 232 et 310 kg K/ha/année (250 kg N, 41 kg P). La teneur en K dans le fourrage a augmenté de façon linéaire avec l'augmentation de la fertilisation potassique. Une teneur en K de 2,2 kg K/dt MS a permis d'atteindre un rendement supérieur à 90 % du rendement maximal (trait interrompu vertical et horizontal). La teneur en Mg dans le fourrage diminue avec une augmentation de la fertilisation potassique (antagonisme K - Mg).



terme, en réduisant la part de légumineuses dans la communauté.

La quantité de N atmosphérique fixée par une prairie varie largement en fonction de sa part en légumineuses, de la productivité du site et du niveau de N dans le sol. Différents essais ont mesuré des quantités de N fixé dans la biomasse récoltée allant de 100 à 380 kg N/ha/an en situation de plaine (résumé par Lüscher *et al.* 2014). Dans les mélanges graminées-légumineuses avec une part en légumineuses ne dépassant pas 50 à 60 %, la quantité de N fixée par décitonne de rendement en légumineuses est d'environ 3 à 5 kg de N/an, dont environ 2 à 3 kg sont récoltés avec le fourrage (Boller *et al.* 2003; Høgh-Jensen *et al.* 2004; Unkovich *et al.* 2010). Au-delà d'une part en légumineuses de 50 à 60 %, une augmentation supplémentaire de la part de légumineuses n'augmente plus la quantité de N fixée (Nyfeler *et al.* 2011). La quantité de N fixée annuellement par une prairie produisant 130 dt MS/an et ayant une part de légumineuses de 15 % peut donc être estimée très approximativement à  $4 \text{ kg N} \times 130 \text{ dt MS} \times 0,15 = 78 \text{ kg N/ha/an}$ . En termes de rendement, des essais conduits en Suisse sur trois sites montrent que 15 % de trèfles dans la prairie équivalent à l'effet de 80 à 100 kg de N minéral appliqué sur des prairies composées uniquement de graminées (Nyfeler *et al.* 2009; Husse *et al.* 2016; Hofer *et al.* 2016). La fixation symbiotique d'azote par les légumineuses améliore la nutrition azotée des graminées de la communauté végétale (Nyfeler *et al.* 2011; Pirhofer-Walzl *et al.* 2012).

## 6.2 Fertilisation phosphatée

Les recommandations de fertilisation phosphatée se basent sur le principe du remplacement des quantités de P exportées des parcelles par la récolte ou l'ingestion du fourrage. Les adaptations de la fertilisation phosphatée en fonction des résultats de l'analyse de sol sont effectuées au moyen des facteurs de correction décrits dans le module 2. Pour préserver la diversité botanique des prairies peu intensives, les apports recommandés de P sont légèrement inférieurs aux prélèvements pour ce type de prairies (tableau 4). Dans ce cas, les 1 à 2 kg de P manquant annuellement par hectare sont prélevés dans les réserves du sol.

L'application d'une fertilisation phosphatée augmente le rendement des prairies lorsque la fourniture du sol en P est insuffisante (Duru et Ducrocq 1997; Philipp *et al.* 2004). Le rendement n'augmente néanmoins plus avec une augmentation de fertilisation phosphatée lorsque la fertilité en P du sol a atteint un niveau satisfaisant (Gallet *et al.* 2003; Liebisch *et al.* 2013). Lorsque la teneur en P atteint 0,30 kg/dt MS dans le fourrage du premier cycle récolté au stade début épiaison, le P n'est pas limitant pour la formation du rendement (Liebisch *et al.* 2013). Ce niveau de teneur en P dans le fourrage correspond aux teneurs de référence (Agroscope 2015b). La teneur en P dans le fourrage s'élève généralement avec l'augmentation de la fertilisation phosphatée (Gallet *et al.* 2003; Philipp *et al.* 2004; Stroia 2007). Ceci même au-delà de la teneur en P requise pour une croissance optimale des herbages (Liebisch *et al.*

2013), ce qui correspond à une consommation de luxe de la part des plantes. L'augmentation de la teneur en P dans le fourrage ne permet pas d'atteindre des prélèvements en P compensant l'augmentation de la fertilisation phosphatée. Une fertilisation supérieure à celle recommandée entraîne donc dans tous les cas un bilan apports-prélèvement positif (la figure 4b présente un exemple). Si ce bilan reste positif à long terme, le P s'accumule dans le sol (Messiga *et al.* 2014). Des stocks importants de P peuvent ainsi se former dans les sols sous prairies (Roger *et al.* 2014). Dans les prairies permanentes, la fertilisation phosphatée augmente de façon marquée la concentration en P dans les premiers centimètres du sol (Schärer *et al.* 2007). Une accumulation de P dans le sol augmente les risques de perte de P dans l'environnement (Stamm *et al.* 1998; Jordan *et al.* 2005).

## 6.3 Fertilisation potassique

Un niveau de fertilité élevé en K dans le sol entraîne une consommation de luxe par les plantes et une teneur élevée en K dans le fourrage. Cela entrave l'absorption du Mg et du calcium (Ca) par les plantes (antagonisme; Kayser et Isselstein 2005; la figure 4c présente un exemple) et favorise, avec d'autres éléments, la propagation de certaines plantes indésirables (ombellifères par exemple). En Suisse, la plupart des herbages sont actuellement riches en K (environ 2,5 à 3,5 kg K/dt MS dans les fourrages récoltés au stade début épiaison) en raison d'une disponibilité en K élevée dans de nombreux sols utilisés pour la production herbagère. Ces teneurs en K sont également excessives par rapport aux apports recommandés pour l'alimentation des herbivores (Schlegel et Kessler 2015) et réduisent l'absorbabilité ruminale du Mg, nécessitant une complémentation accrue en Mg. Les recommandations de fertilisation des prairies et des pâturages sont basées sur une teneur idéale en K (2,2 kg K/dt MS au stade début épiaison) qui assure une bonne croissance des plantes (Duru et Théliér-Huché 1995; Keady et O'Kiely 1998), favorise une composition botanique équilibrée et satisfait les besoins en K des animaux. Les adaptations de la fertilisation potassique en fonction des résultats de l'analyse de sol sont effectuées au moyen des facteurs de correction décrits dans le module 2. Bien que depuis de nombreuses années les apports recommandés en K soient nettement inférieurs aux prélèvements des herbages croissant sur des sols fortement pourvus en K, la teneur moyenne en K dans les fourrages reste actuellement élevée (Python *et al.* 2010; Schlegel *et al.* 2016). En effet, les exploitations herbagères exportent très peu de K, car le lait et la viande en contiennent peu (Sieber 2011), et les teneurs en K dans le sol et le fourrage ne diminuent de ce fait que très lentement même lorsqu'aucun engrais potassique n'est importé sur l'exploitation (Jeangros et Troxler 2006). La teneur de référence en K des engrais de ferme d'herbivores étant établie à partir de la teneur effective en K de la ration, avec comme principale source de K celle des herbages (2,5 à 3,5 kg K/dt MS), les apports en K par les engrais de ferme dépassent les besoins des prairies et des pâturages. Dans ces situations, il faut répartir les engrais de ferme de l'exploitation en fonction du N et du P et renoncer à importer des en-

grais contenant du K. Néanmoins, si les engrais de ferme épandus et le fourrage distribué aux animaux proviennent de l'exploitation, l'excédent de K calculé (différence entre les apports par les engrais de ferme et les besoins des herbages) ne surcharge pas davantage le bilan en K de l'exploitation, puisque les teneurs réelles des engrais de ferme de l'exploitation correspondent aux teneurs en K des fourrages de cette même exploitation. Pour les exploitations herbagères, il faut donc conclure d'un bilan K excédentaire qu'aucun apport d'engrais potassique n'est recommandé (bilan déjections animales – besoin des cultures). Il ne faut par contre pas reporter l'excédent calculé une année donnée dans le bilan de fertilisation de l'année suivante. Lorsque le fourrage contient entre 2,0 et 2,5 kg K/dt MS, il est recommandé de réduire la teneur en K des engrais de ferme issus des herbivores de l'exploitation de 15 % par rapport à la valeur de référence pour calculer le plan de fertilisation. Cette réduction sera de 30 % lorsque la teneur en K du fourrage est inférieure à 2,0 kg K/dt MS (module 4 «Propriétés et utilisation des fertilisants»). Lorsqu'une fertilisation potassique supplémentaire est nécessaire, des apports d'engrais minéraux supérieurs à 170 kg K/ha doivent être répartis en deux fois (par exemple au départ de la végétation et après la 1<sup>re</sup> ou 2<sup>e</sup> coupe).

#### 6.4 Fertilisation magnésienne

A notre connaissance, très peu de résultats ont été publiés concernant l'effet de la fertilisation magnésienne sur le rendement des herbages dans des conditions pédologiques similaires à celles rencontrées en Suisse. Cet effet ne peut donc pas être quantifié pour nos sols, bien que certains essais aient été conduits en Nouvelle-Zélande et aux USA (Hogg et Karlovsky 1967; Reinbott et Blevins 1997; Hanly *et al.* 2005). Une série d'essais en pots montre que la teneur en Mg dans les feuilles à partir de laquelle la croissance du ray-grass est diminuée (moins de 0,10 kg/dt MS; Smith 1985) est inférieure à celle mesurée habituellement dans les fourrages en Suisse (tableau 2). Dans la plupart des cas, il est donc peu probable que la fertilisation magnésienne influence positivement le rendement des herbages. La teneur critique en Mg pour la croissance des graminées fourragères est cependant inférieure aux besoins des vaches laitières (Agroscope 2015a). De plus, le Mg est assez facilement lessivé des sols (Whitehead 2000). Il est de ce fait recommandé de remplacer approximativement, par la fertilisation, les quantités de Mg prélevées par la récolte du fourrage. En cas de teneur en Mg dans le fourrage trop faible par rapport aux besoins des animaux, il faut compléter la ration de ceux-ci et non pas augmenter la fertilisation magnésienne recommandée pour les herbages. Une fertilisation N et P basée sur les engrais de ferme suffit en général pour couvrir les besoins en Mg des herbages (module 4).

#### 6.5 Fertilisation soufrée

Une fourniture suffisante en S est essentielle pour la synthèse des protéines et la formation du rendement en matière sèche. Les prairies temporaires, la luzerne pure ainsi que les prairies permanentes riches en bonnes graminées

et abondamment fertilisées en N ont des besoins en S importants. Pour ces prairies, les prélèvements annuels sont de l'ordre de 20 à 35 kg S/ha. Il convient de privilégier les épandages d'engrais de ferme pour ce type de situation car ces derniers contribuent largement à la fourniture de S assimilable par la prairie. En cas de carences en S, une fertilisation soufrée permet une augmentation significative du rendement des prairies intensives (Mathot *et al.* 2008). Lorsque nécessaire, un moyen efficace d'appliquer une fumure minérale soufrée est de la combiner avec une application de N en utilisant du sulfate d'ammonium. Des carences en S peuvent se manifester notamment dans des prairies de fauche conduites de façon intensive avec des apports importants de N minéral, sur des sols légers et pauvres en matière organique. Mais les situations de carence restent rares et des apports systématiques de S sont à déconseiller. Une méthode d'évaluation des risques de carence en S basée sur les conditions pédo-climatiques et la gestion de la parcelle est expliquée dans le chapitre 4.7 du module 2. Pour les graminées fourragères, la luzerne et les prairies intensives, un apport de 15 à 25 kg S/ha est recommandé dans le cas d'une situation avec risque de carence. Dans ce cas, l'application est effectuée au printemps plutôt qu'en été (Aeby et Dubach 2008). Sur les pâturages, environ 90 % du S prélevé par les animaux est restitué au travers des déjections (Nguyen et Goh 1994).

### 7. Diagnostic basé sur la teneur en éléments nutritifs dans le fourrage

L'analyse des teneurs en éléments nutritifs dans le fourrage peut utilement compléter l'analyse de sol pour dresser un diagnostic a posteriori du niveau de fertilisation des herbages. Les principes généraux concernant les analyses de plantes sont exposés dans le module 3.

Le diagnostic du statut de nutrition des prairies basé sur l'analyse des plantes est compliqué par le fait que les teneurs azotée et minérales du fourrage varient avec le stade de développement de la végétation au moment de la prise de l'échantillon et selon la composition botanique. Des méthodes de diagnostic basées sur le rapport des teneurs de deux ou plusieurs éléments ont donc été développées afin d'éviter cette difficulté (Salette et Huché 1991; Bailey *et al.* 1997).

La méthode des indices de nutrition phosphatée et potassique pour le diagnostic de l'état de nutrition des prairies est basée sur le rapport entre les teneurs en P, respectivement en K, et en N dans le fourrage (Duru et Théliier-Huché 1995). Ces indices permettent de comparer la teneur effective en P, respectivement en K, obtenue par l'analyse du fourrage avec celle permettant une croissance optimale en fonction de la teneur en N dans ce même fourrage. Cette méthode a d'abord été élaborée pour les prairies de graminées. Un facteur de correction a ensuite été calculé pour tenir compte de la part de légumineuses dans les prairies mixtes graminées-légumineuses (Jouany *et al.* 2004; Jouany *et al.* 2005). Il a été vérifié sur trois sites en Suisse

(Liebisch *et al.* 2013). Lorsque les teneurs azotée et minérales sont déterminées à partir d'un échantillon mélangé (graminées et légumineuses mélangées dans un même échantillon), les indices de nutrition sont évalués de la manière suivante:

Indice de nutrition <b>phosphatée</b>	=	$100 \times \frac{\text{Teneur en phosphore}}{0,15 + 0,065 \times \text{Teneur en azote}} + (0,5 \times \text{Part de légumineuses})$
Indice de nutrition <b>potassique</b>	=	$100 \times \frac{\text{Teneur en potassium}}{1,6 + 0,525 \times \text{Teneur en azote}} + (0,5 \times \text{Part de légumineuses})$

Pour ces équations (Jouany *et al.* 2005), les teneurs en N, P et K sont exprimées en pourcent, ce qui correspond aux valeurs en kg/dt de MS indiquées dans le tableau 2. Les analyses de fourrage sont effectuées sur des échantillons récoltés lors du 1<sup>er</sup> cycle. La part de légumineuses dans la prairie est exprimée en pourcent de la biomasse récoltée. Ces indices ne sont pas valables dans des conditions de sur-fertilisation en N.

Exemple: si les teneurs en N, P et K dans le fourrage d'une prairie ayant une part de légumineuses de 15 % sont respectivement 2,5, 0,33 et 2,8 kg/dt MS, alors l'indice de nutrition phosphatée est de 113 est celui de nutrition potassique de 104.

Le facteur de correction pour la part de légumineuses n'a pas été testé pour des prairies avec plus de 50 % de légumineuses. Pour les prairies riches en légumineuses, il est donc préférable de réaliser les analyses après avoir retiré les légumineuses des échantillons de fourrage.

L'interprétation des indices de nutrition phosphatée et potassique ainsi obtenus est décrite dans le tableau 8. L'indice de nutrition phosphatée d'une prairie montre cependant des valeurs très variables selon les années (Stroia 2007). Une moyenne sur plusieurs années est donc nécessaire pour un diagnostic sûr.

**Tableau 8. Recommandations de fertilisation basées sur l'interprétation des indices de nutrition phosphatée et potassique (interprétation selon Salette et Huché 1991).**

Indice	Interprétation	Recommandations
> 120	excédentaire	Réduire la fertilisation P ou K des parcelles concernées en utilisant les recommandations de fertilisation du tableau 3a, après avoir réévalué le rendement ainsi que l'intensité d'utilisation en fonction du nombre d'utilisations et du niveau de fertilisation azotée.
80 à 120	satisfaisant	Fertilisation correspondant aux recommandations du tableau 3a.
< 80	insuffisant	Planifier une fertilisation de redressement en fonction des analyses de sol selon le module 2/ Caractérisation et analyses du sol.

Le principe des indices de nutrition basés sur le rapport entre la teneur de l'élément concerné et la teneur en N dans le fourrage a également été testé pour le S (Mathot *et al.* 2009). Les seuils obtenus dans cette étude doivent cependant encore être validés avant qu'une interprétation

des besoins en S puisse être conseillée. Un rapport S/N inférieur à 0,07 (de 0,065 à 0,075 selon les études) semble indiquer une situation de déficience en S, alors qu'un rapport supérieur indique une nutrition soufrée satisfaisante (Bailey *et al.* 1997; Whitehead 2000; Mathot *et al.* 2009). Cette valeur indicative est valable pour les prairies riches en graminées alors que ce seuil est plus bas pour les prairies riches en légumineuses (Jones et Sinclair 1991; Whitehead 2000).

## 8. Engrais de ferme

La majeure partie des éléments nutritifs exportés des herbages par la récolte et l'ingestion de fourrage se retrouvent dans les engrais de ferme (voir module 4). Pour les exploitations herbagères, la gestion raisonnée de la fertilisation passe donc par un recyclage adéquat des engrais de ferme à l'échelle de l'exploitation. Les teneurs indicatives en éléments nutritifs dans les différents types d'engrais de ferme sont indiqués dans le tableau 6 du module 4. Ce tableau montre que le rapport entre les teneurs des différents éléments nutritifs est fortement influencé par le type d'engrais de ferme, ce dont il faut tenir compte lors de la répartition des engrais de ferme sur l'exploitation. On évitera par exemple d'épandre du purin pauvre en fèces sur des herbages dont le sol est enrichi en K, car le rapport K:N disponible est particulièrement élevé pour ce type d'engrais de ferme. Plus d'informations sur l'utilisation des engrais de ferme sont données dans le module 4.

## 9. Restitutions au pâturage

Pour les pâturages, les apports d'engrais recommandés sont inférieurs aux quantités de nutriments contenues dans les fourrages ingérés par les animaux, car des éléments nutritifs sont directement restitués par les déjections pendant la pâture. Dans les recommandations de fertilisation pour les pâturages (aucune fauche) indiquées dans le tableau 3a, les restitutions pendant la pâture sont déjà prises en compte. Celles-ci dépendent de la technique de pâture, en particulier de sa durée journalière et de la part de la ration consommée au pâturage. Pour les pâturages intensifs et mi-intensifs, le tableau 3a indique deux recommandations de fertilisation. La première est valable pour les systèmes de pâture avec détention à l'étable dans lesquels les animaux consacrent l'essentiel du temps dispo-

nible sur le pâturage à se nourrir (par exemple 50 % d'affouragement au pâturage pendant 5 à 6 heures de pâture par jour, ou près de 100 % avec 10 à 12 h). La seconde valeur s'applique à une pâture sans détention à l'étable (les animaux se nourrissent entièrement sur le pâturage où ils séjournent en permanence, sauf éventuellement pendant la traite pour les vaches laitières), aussi appelée pâture intégrale. Dans ce cas, la majeure partie des éléments nutritifs ingérés par les animaux est excrétée sur le pâturage et les exportations sont faibles. Les recommandations de fertilisation ne diminuent toutefois pas proportionnellement à l'augmentation des déjections sur le pâturage, car la répartition des bouses et des pissats est moins régulière lorsque les animaux sont en permanence sur le pâturage. Les pâturages non prioritairement destinés à l'affouragement du bétail ne doivent pas être fertilisés car les quantités importantes d'éléments nutritifs apportés par les déjections suffisent à couvrir les besoins des plantes.

Pour les prairies occasionnellement pâturées (fauche-pâture), les restitutions dues à la pâture sont déduites des recommandations pour prairie de fauche. Les restitutions désignent les quantités moyennes d'éléments nutritifs qui peuvent être valorisées par les plantes lors d'une pâture moyenne (rendement consommé d'environ 15 dt MS/ha, soit environ 95 UGB jours/ha pour une consommation journalière de 16 kg MS/UGB/jour). Le tableau 5 donne les restitutions par la pâture en P, K et Mg, selon l'intensité d'exploitation et la technique de pâture.

Jusqu'à 80 % du N prélevé par les animaux au pâturage lui sont restitués par les déjections (Haynes et Williams 1993). Le N est ainsi déposé de manière très concentrée, avec des quantités correspondant à plus de 500 kg N/ha à l'endroit du dépôt d'un pissat ou d'une bouse (Ball et Ryden 1984; Whitehead 2000). La très forte concentration en N à l'endroit des déjections ainsi que la répartition très irrégulière induisent une utilisation peu efficace de ce N par les

plantes. Le N des restitutions des animaux au pâturage est ainsi nettement moins efficace pour le système de production que le N excrété par les animaux en stabulation puis épandu de façon homogène avec les engrais de ferme sur la surface à fertiliser. En effet, en comparaison avec le N des engrais de ferme, celui des restitutions des animaux au pâturage subit des pertes plus élevées, est nettement moins efficace pour la production de biomasse et est moins efficacement prélevé par les plantes. L'institut national de recherche agronomique français (INRA) a récemment conduit un travail de synthèse sur les flux de N en agriculture (Peyraud *et al.* 2012). Dans cette synthèse, les auteurs retiennent les valeurs suivantes pour la part totale de N des déjections prélevé par les plantes à l'endroit des restitutions: 30–35 % pour les pissats et seulement 10–20 % pour les bouses. Sur la base de différentes études sur l'effet des déjections sur la production de biomasse, l'effet sur le rendement peut être estimé à un ordre de grandeur de 3 à 5 kg MS par kg de N dans les déjections en moyenne pour les pissats et les bouses (Day et Detling 1990; Deenen et Middelkoop 1992; Williams et Haynes 1994; Williams et Haynes 1995; Decau *et al.* 2003; Di et Cameron 2007; Troxler *et al.* 2008; Moir *et al.* 2013; White-Leech *et al.* 2013). Pour un pâturage intensif brouté par des vaches laitières et avec un nombre de jours de pâture nécessaires à la consommation de l'ensemble du fourrage produit par le pâturage, l'effet sur le rendement du N contenu dans les déjections au pâturage serait ainsi de seulement 5 à 8 % par rapport au rendement total. La variabilité des valeurs obtenues dans ces différentes études est cependant très importante.

## 10. Entretien calcique du sol

L'entretien calcique du sol est traité dans le chapitre 5 du module 2. Les spécificités liées aux herbages sont décrites dans le chapitre 5.3.2 de ce module.

## 11. Bibliographie

- Aeby P. & Dubach S., 2008. Schwefelversorgung von Wiesen: Düngung ausnahmsweise nötig. *UFA-Revue* 3/2008, 50–51.
- Agroscope, 2015a. Apports alimentaires recommandés et tables de la valeur nutritive pour les ruminants (Livre vert). Accès: <http://www.agroscope.admin.ch/futtermitteldatenbank/04834/index.html?lang=fr> [9 oct. 2015].
- Agroscope, 2015b. Base suisse de données des aliments pour animaux. Accès: <http://www.feedbase.ch> [9 oct. 2015].
- Bailey J. S., Cushnahan A. & Beattie J. A. M., 1997. The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) for diagnosing the nutrient status of grassland swards: II. Model calibration and validation. *Plant Soil* 197, 137–147.
- Ball P. R. & Ryden J. C., 1984. Nitrogen relationships in intensively managed temperate grasslands. *Plant Soil* 76, 23–33.
- Boller B. C., Lüscher A. & Zanetti S., 2003. Schätzung der biologischen Stickstoff-Fixierung in Klee-Gras-Beständen, Schriftenreihe der FAL 45, 47–54.
- Daccord R., Arrigo Y., Kessler J., Jeangros B., Scephovic J., Schubiger F.X. & Lehmann J., 2001. Valeur nutritive des plantes des prairies. 3. Teneurs en calcium, phosphore, magnésium et potassium. *Rev. suisse Agric.* 33, 141–146.
- Day T. A. & Detling J. K., 1990. Grassland patch dynamics and herbivore grazing preference following urine deposition. *Ecology* 71, 180–188.
- Decau M. L., Simon J. C & Jacquet A., 2003. Fate of urine nitrogen in three soils throughout a grazing season. *J. Environ. Qual.* 32, 1405–1413.
- Deenen P. J. A. G. & Middelkoop N., 1992. Effects of cattle dung and urine on nitrogen uptake and yield of perennial ryegrass. *Neth. J. Agr. Sci.* 40, 469–482.
- Di H. J. & Cameron K. C., 2007. Nitrate leaching losses and pasture yields as affected by different rates of animal urine nitrogen returns and application of a nitrification inhibitor – a lysimeter study. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 79, 281–290.
- Dietl W., 1986. Pflanzenbestand, Bewirtschaftungsintensität und Ertragspotential von Dauerwiesen. *Schweiz. Landwirtsch. Monatshefte* 64, 241–262.
- Dietl W. & Lehmann J., 2004. Ökologischer Wiesenbau; Nachhaltige Bewirtschaftung von Wiesen und Weiden. Österreicherischer Agrarverlag, Leopoldsdorf, 136 p.
- Duru M. & Ducroq H., 1997. A nitrogen and phosphorus herbage nutrient index as a tool for assessing the effect of N and P supply on the dry matter yield of permanent pastures. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 47, 59–69.
- Duru M. & Thélier-Huché L., 1995. N and P-K status of herbage: use for diagnosis of grasslands, in: INRA (Ed.), Diagnostic Procedures for Crop N Management and Decision Making, Paris (Les Colloques n° 82), 125–138.
- Elsässer M., 2000. Auswirkungen reduzierter Stickstoffdüngung auf Erträge, Futterwert und Botanische Zusammensetzung von Dauergrünland sowie Nährstoffverhältnisse im Boden. *Wissenschaftl. Fachverl.* 164 p.
- Fabre B. & Kockmann F., 2006. Les effets du chaulage sur les prairies permanentes ou de longue durée. Synthèse bibliographique. *Fourrages* 185, 103–122.
- Gallet A., Flisch R., Ryser J.-P., Nösberger J., Frossard E. & Sinaj S., 2003. Uptake of residual phosphate and freshly applied diammonium phosphate by *Lolium perenne* and *Trifolium repens*. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 166, 557–567.
- Hanly J. A., Loganathan P. & Currie L. D., 2005. Effect of serpentine rock and its acidulated products as magnesium fertilisers for pasture, compared with magnesium oxide and Epsom salts, on a Pumice Soil. 1. Dry matter yield and magnesium uptake. *New Zeal. J. Agr. Res.* 48, 451–446.
- Haynes R. J. & Williams P. H., 1993. Nutrient Cycling and Soil Fertility in the Grazed Pasture Ecosystem. *Adv. Agron.* 49, 119–199.
- Hofer D., Suter M., Haughey E., Finn J. A., Hoekstra N. J., Buchmann N. & Lüscher A., 2016. Yield of temperate forage grassland species is either largely resistant or resilient to experimental summer drought. *J. Appl. Ecol.* doi:10.1111/1365-2664.12694
- Hogg D. E. & Karlovsky J., 1968. The relative effectiveness of various magnesium fertilisers on a magnesium-deficient pasture. *New Zeal. J. Agr. Res.* 11, 171–183.
- Humbert J.-Y., Dwyer J. M., Andrey A. & Arlettaz R., 2015. Impacts of nitrogen addition on plant biodiversity in mountain grasslands depend on dose, application duration and climate: a systematic review. *Glob. Change Biol.* 22, 110–120.
- Husse S., Huguenin-Elie O., Buchmann N. & Lüscher A., 2016. Larger yields of mixtures than monocultures of cultivated grassland species match with asynchrony in shoot growth among species but not with increased light interception. *Field Crops Res.* 194, 1–11.
- Jacot K. A., Lüscher A., Nösberger J. & Hartwig U. A., 2000. Symbiotic N<sub>2</sub> fixation of various legume species along an altitudinal gradient in the Swiss Alps. *Soil Biol. Biochem.* 32, 1043–1052.
- Jeangros B. & Thöni E., 1994. Utilisation des engrais de ferme sur les prairies permanentes. Synthèse de résultats expérimentaux et recommandations préconisées en Suisse. *Fourrages* 140, 393–406.
- Jeangros B. & Troxler J., 2006. Bilan des éléments fertilisants sur une exploitation laitière de montagne. *Rev. suisse Agric.* 38 (3), 121–125.
- Jeangros B., 1993. Prairies permanentes en montagne. I. Effets de la fréquence des coupes et de la fertilisation azotée sur la composition botanique. *Rev. suisse Agric.* 25, 345–360.
- Jeangros B., Scephovic J., Schubiger F. X., Lehmann J., Daccord R. & Arrigo, Y., 2001. Valeur nutritive des plantes de prairies. 1. Teneurs en matière sèche, matière azotée et sucres. *Rev. suisse Agric.* 33, 73–80.
- Jones M. B. & Sinclair A. G., 1991. Application of DRIS to white clover based pastures. *Commun. Soil Sci. Plan.* 22, 1895–1918.

- Jordan P., Menary W., Daly K., Kiely G., Morgan G., Byrne P. & Moles R., 2005. Patterns and processes of phosphorus transfer from Irish grassland soils to rivers – integration of laboratory and catchment studies. *J. Hydrol.* 304, 20–34.
- Jouany C., Cruz P., Petibon P. & Duru M., 2004. Diagnosing phosphorus status of natural grassland in the presence of white clover. *Eur. J. Agron.* 21, 273–285.
- Jouany C., Cruz P., Theau J. P., Petibon P., Foucras J. & Duru M., 2005. Diagnostic du statut de nutrition phosphatée et potassique des prairies naturelles en présence de légumineuses. *Fourrages* 184, 547–555.
- Kayser M. & Isselstein J., 2005. Potassium cycling and losses in grassland systems: a review. *Grass Forage Sci.* 60, 213–224.
- Keady T. M. J. & O’Kiely P., 1998. An evaluation of potassium and nitrogen fertilisation of grassland, and date of harvest, on fermentation, effluent production, dry-matter recovery and predicted feeding value of silage. *Grass Forage Sci.* 53, 326–337.
- Laidlaw 1980. The effects of nitrogen fertilizer applied in spring on swards of ryegrass sown with four cultivars of white clover. *Grass Forage Sci.* 35, 295–299.
- Lalor S. T. J., Schröder J. J., Lantinga E. A., Oenema O., Kirwan L. & Schulte R. P. O., 2011. Nitrogen fertilizer replacement value of cattle slurry in grassland as affected by method and timing of application. *J. Environ. Qual.* 40, 362–373.
- Lauber K., Wagner G. & Gygax A., 2012. *Flora Helvetica - Flore illustrée de Suisse*. Haupt Verlag, Berne.
- Lazzarotto P., Calanca P., Semenov M. & Fuhrer J., 2010. Transient responses to increasing CO<sub>2</sub> and climate change in an unfertilized grass-clover sward. *Climate Res.* 41, 221–232.
- Lehmann J., Rosenberg E. & und Briner H.-U., 2001. Modell für die Berechnung des Ertrages von Klee-Gras-Mischungen. *Agrarforsch.* 8 (9), 364–369.
- Liebisch F., Bünemann E. K., Huguenin-Elie O., Jeangros B., Frossard E. & Oberson A., 2013. Plant phosphorus nutrition indicators evaluated in agricultural grasslands managed at different intensities. *Eur. J. Agron.* 44, 67–77.
- Mathot M., Mertens J., Verlinden G., Lambert R., 2008. Positive effects of sulphur fertilisation on grasslands yields and quality in Belgium. *Eur. J. Agron.* 28, 655–658.
- Mathot M., Thélier-Huché L. & Lambert R., 2009. Sulphur and nitrogen content as sulphur deficiency indicator for grasses. *Eur. J. Agron.* 30, 172–176.
- Meisser M., Deléglise C., Mosimann E., Signarbieux C., Mills R., Schlegel P., Buttler A. & Jeangros B., 2013. Effets d’une sécheresse estivale sévère sur une prairie permanente de montagne du Jura. *Rech. Agron. Suisse* 4 (11–12), 476–483.
- Messiga A. J., Ziadi N., Bélanger G. & Morel C., 2014. Relationship between soil phosphorus and phosphorus budget in grass swards with varying nitrogen applications. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 78, 1481–1488.
- Moir J. L., Edwards G. R. & Berry L. N., 2013. Nitrogen uptake and leaching loss of thirteen temperate grass species under high N loading. *Grass Forage Sci.* 68, 313–325.
- Mosimann E., 2005. Caractéristiques des pâturages pour vaches laitières dans l’ouest de la Suisse. *Rev. suisse Agric.* 37 (3), 99–106.
- Mosimann E., Deléglise C., Demenga M., Frund D., Sinaj S. & Charles R., 2013. Disponibilité en eau et production fourragère en zone de grandes cultures. *Rech. Agron. Suisse* 4 (11–12), 468–475.
- Mosimann E., Meisser M., Deléglise C. & Jeangros B., 2012. Potentiel fourrager des pâturages du Jura. *Rech. Agron. Suisse* 3 (11–12), 516–523.
- Mosimann E., Suter D., Frick R. & Rosenberg E., 2012. Mélanges standard pour la production fourragère. Révision 2013-2016. *Rech. Agron. Suisse* 3 (10), 1–12.
- Nevens F. and Rehuel D., 2003. Effects of cutting or grazing grass swards on herbage yield, nitrogen uptake and residual soil nitrate at different levels of N fertilization. *Grass Forage Sci.* 58, 431–449.
- Nguyen M. L. & Goh K. M., 1994. Sulphur cycling and its implications on sulphur fertilizer requirements of grazed grassland ecosystems. *Agr. Ecosyst. Environ.* 49, 173–206.
- Nyfelner D., Huguenin-Elie O., Suter M., Frossard E. & Lüscher A., 2011. Grass-legume mixtures can yield more nitrogen than legume pure stands due to mutual stimulation of nitrogen uptake from symbiotic and non-symbiotic sources. *Agr. Ecosyst. Environ.* 140, 155–163.
- Nyfelner D., Huguenin-Elie O., Suter M., Frossard E., Connolly J. & Lüscher A., 2009. Strong mixture effects among four species in fertilized agricultural grassland led to persistent and consistent transgressive overyielding. *J. Appl. Ecol.* 46, 683–691.
- Pauthenet Y., Roumet, J. P., Neyroz A., 1994. Influence de la fertilisation azotée sur la végétation de prairies de fauche en vallée d’Aoste (Italie). *Fourrages* 139, 375–378.
- Peyraud J.-L., Cellier P., Donnars C. & Réchauchère O. (éditeurs), 2012. Les flux d’azote liés aux élevages, réduire les pertes, rétablir les équilibres. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA (France), 68 p.
- Philipp A., Huguenin-Elie O., Flisch R., Gago R., Stutz C., Kessler W. & Sinaj S., 2004. Einfluss der Phosphordüngung auf eine Fromentalwiese. *Agrarforsch.* 11 (3), 86–91.
- Python P., Boessinger M. & Buchmann M., 2010. Teneur moyenne en minéraux majeurs des fourrages secs ventilés selon l’altitude et la situation géographique. *ETH-Schriftenreihe zur Tierernährung* 33, 159–162.
- Reid D., 1978. The effects of frequency of defoliation on the yield response of a perennial ryegrass sward to a wide range of nitrogen application rates. *J. Agr. Sci., Cambridge* 90, 447–457.
- Reid D., 1980. The effects of rates of potassium application on the production and quality of herbage from a perennial ryegrass sward receiving a wide range of nitrogen rates. *J. Agr. Sci., Cambridge* 95, 83–100.
- Reinbott T. M. & Blevins D. G., 1997. Phosphorus and magnesium fertilization interaction with soil phosphorus level: Tall fescue yield and mineral element content. *J. Prod. Agric.* 10, 260–265.
- Roger A., Libohova Z., Rossier N., Joost S., Maltas A., Frossard E. & Sinaj S., 2014. Spatial variability of soil phos-

- phorus in the Fribourg canton, Switzerland. *Geoderma* 217–218, 26–36.
- Salette J. & Huché L., 1991. Diagnostic de l'état de nutrition minérale d'une prairie par l'analyse de végétal: principes, mis en oeuvre, exemples. *Fourrages* 125, 3–18.
- Schärer M., Stamm C., Vollmer T., Frossard E., Oberson A., Flühler H. & Sinaj S., 2007. Reducing phosphorus losses from over-fertilized grassland soils proves difficult in the short term. *Soil Use Manage.* 23 (Suppl. 1), 154–164.
- Schlegel P. & Kessler J., 2015. Minéraux et vitamines. Dans: Apports alimentaires recommandés et tables de la valeur nutritive pour les ruminants (Livre vert), chapitre 4, Ed. Agroscope, Posieux. Accès: <http://www.agroscope.admin.ch/futtermitteldatenbank/04834/index.html?lang=fr> [9 oct. 2015]
- Schlegel P., Wyss U., Arrigo Y. & Hess H.-D., 2016. Mineral concentrations of fresh herbage from mixed grassland as influenced by botanical composition, harvest time and growth development. *Anim. Feed Sci. Tech.* 219, 226–233.
- Sieber R., 2011. Zusammensetzung von Milch und Milchprodukten schweizerischer Herkunft. ALP Science n°538, Agroscope, Berne. 40 p.
- Smith G. S., 1985. Critical leaf concentrations for deficiencies of nitrogen, potassium, phosphorus, sulphur, and magnesium in perennial ryegrass. *New Phytol.* 101, 393–409.
- Stamm C., Flühler H., Gächter R., Leuenberger J. & Wunderli H., 1998. Preferential transport of phosphorus in drained grassland soils. *J. Environ. Qual.* 27, 515–522.
- Stroia C., 2007. Etude de fonctionnement de l'écosystème prairial en conditions de nutrition N et P sub limitantes. Application au diagnostic de nutrition. Thèse de doctorat N° 2446, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Thalmann H., 1985. Wirkung belüfteter und unbelüfteter Rindergülle unter Schnitt und Beweidung auf Dauergrünland. Diss. Technische Universität München.
- Thomet P., Stettler M., Hadorn M. & Mosimann E., 2008. Pâturages: production pilotée par la fumure azotée. *Rev. suisse Agric.* 40 (1), 41–45.
- Troxler J., Ryser J. P. & Jeangros B., 2008. Influence des déjections bovines sur un gazon de graminées cultivé en lysimètres. *Rev. suisse Agric.* 40 (6), 259–265.
- Unkovich M. J., Baldock J. & Peoples M. B., 2010. Prospects and problems of simple linear models for estimating symbiotic N<sub>2</sub> fixation by crop and pasture legumes. *Plant Soil* 329, 75–89.
- Whitehead D. C., 2000. Nutrient elements in grassland: soil-plant-animal relationships. CAB International, Wallingford, UK, 369 p.
- White-Leech R., Liu K., Sollenberger L. E., Woodard K. R. & Interrante S. M., 2013. Excreta deposition on grassland patches. I. Forage harvested, nutritive value, and nitrogen recovery. *Crop Sci.* 53, 688–695.
- Williams P. H. & Haynes R. J., 1994. Comparison of initial wetting pattern, nutrient concentrations in soil solution and the fate of 15N labelled urine in sheep and cattle urine patch areas of pasture soil. *Plant Soil* 162, 49–59.
- Williams P. H. & Haynes R. J., 1995. Effect of sheep, deer and cattle dung on herbage production and soil nutrient content. *Grass Forage Sci.* 50, 263–271.
- Wyss U. & Kessler J., 2002. L'intensité d'exploitation des prairies influence la teneur en minéraux de l'herbe. *Rev. suisse Agric.* 9, 292–297.
- Zimmermann M., Koch B., Kessler W. & Besson J. M., 1997. Der Güllezeitpunkt entscheidet über die N-Wirkung. *Agrarforsch.* 4 (3), 133–136.

## 12. Liste des tableaux

Tableau 1a. Relation entre l'altitude (m) et le potentiel moyen de rendement (dt MS/ha) en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation.....	9/4
Tableau 1b. Exemples d'estimations du rendement annuel récolté en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation ainsi que de l'altitude à l'aide des équations indiquées dans le tableau 1a .....	9/5
Tableau 2. Teneurs en macro-éléments dans les herbages de composition botanique équilibrée en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation.....	9/6
Tableau 3a. Prélèvements annuels indicatifs et recommandations de fertilisation en kg de N, P, K et Mg par unité de matière sèche produite pour les herbages en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation .....	9/6
Tableau 3b. Exemples de la quantité recommandée d'apport en kg de N, P, K et Mg par hectare et année calculée selon les recommandations de fertilisation du tableau 3a pour les moyennes indicatives de rendement indiquées dans le tableau 1b en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation .....	9/8
Tableau 4. Relation entre les prélèvements et les recommandations de fertilisation pour P, K et Mg, en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation des herbages.....	9/9
Tableau 5. Restitutions en P, K et Mg par cycle de pâture à déduire des recommandations de fertilisation pour les prairies fertilisées occasionnellement utilisées pour la pâture (prairies de fauche-pâture).....	9/9
Tableau 6. Prélèvements annuels en N, P, K et Mg et recommandations de fertilisation pour les mélanges graminées-légumineuses en culture dérobée, les semis d'août de prairies temporaires, ainsi que pour la production de semences de graminées et de légumineuses fourragères.....	9/10
Tableau 7. Apports recommandés de N pour les prairies selon le type de prairie et le mode d'utilisation .....	9/11
Tableau 8. Recommandations de fertilisation basées sur l'interprétation des indices de nutrition phosphatée et potassique. ....	9/15

## 13. Liste des figures

Figure 1. Types de prairies selon la fréquence des utilisations et le niveau de fertilisation correspondant. ....	9/3
Figure 2. Les pertes au champ survenant lors du préfanage et fanage au sol, ainsi que lors de la récolte, sont prises en compte dans les valeurs de rendements présentées dans les tableaux 1a et 1b, mais pas les pertes de conservation (silo, séchoir ou tas). ....	9/7
Figure 3. Dans les situations défavorables aux espèces de graminées pouvant valoriser beaucoup d'azote, une fertilisation azotée élevée favorise la prolifération de plantes nitrophiles à tiges grossières (ici <i>Heracleum sphondylium</i> L.). ....	9/10
Figure 4. Illustration de l'effet de la fertilisation sur le rendement et les teneurs en N, P, K et Mg d'une prairie de fauche. Les résultats présentés ont été obtenus après 9 ans de fertilisation contrastée. Cet essai de fertilisation a été conduit sur une prairie permanente utilisée de manière intensive, dominée par du ray-grass d'Italie ( <i>Lolium multiflorum</i> Lam.) et située à Hohenrain (610 m d'altitude, 1'100 mm de précipitations annuelles). ....	9/12



## 14. Annexe

Annexe au tableau 2. Teneurs en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et en K<sub>2</sub>O dans les herbages de composition botanique équilibrée en fonction du mode et de l'intensité d'utilisation (selon Agroscope 2015b, en considérant que le stade d'utilisation est retardé lorsque l'intensité d'utilisation diminue).

Mode et intensité d'utilisation	Teneurs en macro-éléments (kg/dt de matière sèche)			
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		K <sub>2</sub> O	
	Ø <sup>1</sup>	Intervalle <sup>2</sup>	Ø <sup>1</sup>	Intervalle <sup>2</sup>
<b>Prairie</b>				
Intensive	0,82	0,71–0,96	3,6	3,0–4,1
Mi-intensive	0,76	0,64–0,89	3,3	2,8–3,7
Peu-intensive	0,64	0,53–0,78	2,5	2,0–3,1
Extensive	0,53	0,41–0,64	1,7	1,2–2,2
<b>Pâturage</b>				
Intensif	0,89	0,78–1,03	3,7	3,3–4,3
Mi-intensif	0,82	0,71–0,96	3,5	3,0–4,1
Peu-intensif	0,71	0,60–0,85	3,0	2,5–3,5
Extensif	0,62	0,50–0,76	2,4	1,9–2,9

<sup>1</sup> Valeurs moyennes pondérées par la part de rendement du 1<sup>er</sup> cycle de végétation.

<sup>2</sup> Intervalles indiquant la fourchette de valeurs fréquemment mesurées.





## 10/ Fertilisation des cultures maraîchères

Reto Neuweiler et Jürgen Krauss  
Agroscope, 8820 Wädenswil, Suisse

Renseignements: [reto.neuweiler@agroscope.admin.ch](mailto:reto.neuweiler@agroscope.admin.ch)

## Table des matières

1. Introduction.....	10/3
2. Besoins en éléments minéraux des différentes espèces de légumes .....	10/3
3. Fertilisation azotée .....	10/8
3.1 Dosage de la fertilisation azotée selon la méthode $N_{\min}$ .....	10/8
3.2 Fertilisation azotée basée sur l'analyse de sève .....	10/13
4. Fertilisation en soufre .....	10/13
4.1 Carence en soufre .....	10/13
4.2 Besoins en soufre des cultures de légumes .....	10/13
4.3 Application d'engrais contenant du soufre .....	10/13
5. Rôle de l'approvisionnement en oligo-éléments .....	10/13
6. Fertilisation foliaire.....	10/14
7. Utilisation d'engrais de recyclage.....	10/15
8. Conclusion .....	10/15
9. Bibliographie .....	10/15
10. Liste des tableaux .....	10/16

## 1. Introduction

Le but principal de la fertilisation des plantes est de remplacer les éléments nutritifs soustraits au sol et exportés avec les récoltes, ainsi que de compenser les pertes d'éléments nutritifs occasionnées par ailleurs. Une fertilisation répondant aux besoins des cultures constitue la base d'une production durable de légumes de qualité (Finck 1979). Le développement qualitatif dépend impérativement de la disponibilité de chaque élément nutritif en quantité optimale, tout au long de la culture.

Si les légumes proviennent de cultures insuffisamment pourvues en certains éléments nutritifs au cours de leur croissance, ils sont généralement invendables car ils ne remplissent pas les exigences de qualité imposées par le marché (Neuweiler *et al.* 2008). D'autre part, un ou plusieurs éléments nutritifs en excès peuvent favoriser l'apparition de troubles physiologiques et les attaques de pathogènes (Bergmann 1993). Une suralimentation azotée s'avère particulièrement critique non seulement du point de vue écologique, mais aussi dans la perspective de défauts qualitatifs du produit récolté. Une disponibilité élevée d'azote (N) entraîne un affaiblissement des tissus de la plante, d'où un risque accru de dégâts occasionnés par les pressions ou les chocs dans les opérations de récolte, de parage, de conditionnement et de mise sur le marché (Krug 1991). La mauvaise conservation des légumes de garde est souvent liée à un excès de N. Par exemple, s'il y a trop de N disponible dans le sol vers la fin d'une culture d'oignons, la maturation de ces derniers est retardée. On constate également une occurrence augmentée de l'épaississement du collet (Crüger 1982).

Chez les légumes feuilles et les légumes tiges, une alimentation azotée riche s'accompagne d'une augmentation de la teneur de nitrates dans le produit récolté (Vogel 1996). Celle-ci peut dépasser les valeurs tolérées, surtout dans les périodes de faible éclaircissement naturel au printemps et en automne (Wonneberger et Keller 2004).

En général, une trop grande disponibilité de N stimule excessivement la croissance des plantes, ce qui peut entraîner une carence secondaire d'autres macro- ou oligo-éléments nutritifs. Dans les cultures de salades et de choux à croissance très vigoureuse, il en résulte une plus grande fréquence d'apparition de nécroses marginales sur les jeunes feuilles (brunissement du cœur) (Holtschulze 2005). Chez les légumes fruits, un apport élevé de N favorise l'apparition de nécroses apicales, surtout par temps chaud (Bergmann 1993). Ces deux désordres physiologiques sont en rapport avec une carence secondaire de calcium (Ca) induite par la disponibilité élevée de N. Une dotation trop élevée de potassium (K) peut également entraîner l'occurrence accrue de nécroses marginales et apicales, en raison de l'antagonisme entre K et Ca (diminution de la disponibilité de Ca).

## 2. Besoins en éléments minéraux des différentes espèces de légumes

Dans le tableau 1 figurent les **besoins bruts** en N, phosphore (P), K et Mg correspondant aux exportations par des cultures donnant des rendements optimaux de légumes de qualité. De la récolte à la mise sur le marché des différents légumes, les opérations laissent des quantités variables de **résidus**. La plupart de ces résidus restent sur le champ dans les cultures de plein champ, et les éléments nutritifs P, K et Mg qu'ils contiennent peuvent être totalement inclus dans le calcul de la fertilisation des cultures suivantes. Par contre, le N contenu dans les résidus de récolte n'est assimilable qu'à 80% environ pour les cultures suivantes (=  $N_{\text{disponible}}$ ). Comme il y a des pertes d'azote, surtout au cours de la période de végétation, les cultures suivantes ne peuvent utiliser qu'une part estimée à 20% (=  $N_{\text{utilisable}}$ ) de cet azote disponible.

Les **besoins nets** en éléments nutritifs correspondent aux quantités exportées avec les récoltes. Elles doivent être remplacées. Pour P, K et Mg, ils sont calculés d'après les besoins bruts moins les teneurs des résidus de récolte restés au champ. Pour le calcul des besoins nets de N, on ne compte, comme indiqué ci-dessus, que 20% de tout le  $N_{\text{disp}}$  contenu dans les résidus de récolte.

Pour P, K et Mg, le calcul des besoins se base sur des sols suffisamment pourvus d'éléments nutritifs (classe C selon l'analyse du sol = niveau de fertilité satisfaisant).

**Calcul de l'alimentation minérale/bilan des éléments nutritifs:** Si les teneurs du sol en éléments P, K et Mg sont à un niveau inférieur ou supérieur au niveau de fertilité de classe C, les besoins bruts en éléments nutritifs sont corrigés d'après les résultats de l'analyse de terre (voir chapitre 4, module 2). Les éléments nutritifs contenus dans les résidus de récolte de la culture précédente sont déduits. Si l'on veut justifier des besoins supplémentaires de P dans le bilan (Suisse-Bilanz) de l'Office fédéral de l'agriculture OFAG, il faut présenter les besoins au moyen d'un bilan d'exploitation prenant en compte les analyses de terre. Pour le calcul simplifié de Suisse-Bilanz, on utilise comme norme les valeurs de besoins nets basées sur des analyses de terre.

En cultures maraîchères, les teneurs en éléments nutritifs disponibles sont déterminées selon la méthode de l'extrait à l'acétate d'ammonium + EDTA (AAE10) et/ou selon la méthode de l'extrait à l'eau ( $H_2O_{10}$ ). Il faut tenir compte des propriétés du sol dans le choix de la méthode d'analyse (chapitre 4, module 2).

Si l'on dispose des résultats des deux méthodes d'analyse, on calculera des facteurs globaux de correction pour P, K et Mg. Pour ce faire, on prend la moyenne des facteurs basés sur les résultats de l'analyse par la méthode de l'acétate d'ammonium (AAE10) (1x) et (à double) des facteurs de l'analyse par la méthode de l'extrait à l'eau ( $H_2O_{10}$ ) (2x) (Gysi *et al.* 2001).

$$\text{Facteur global de correction} = \frac{(1 \times \text{facteur AAE10} + 2 \times \text{facteur H}_2\text{O10})}{3}$$

La fertilisation azotée peut être optimisée en prenant en compte le niveau actuel du  $N_{\text{disp}}$ . Les analyses de terre  $N_{\text{min}}$  donnent de bonnes indications sur l'assimilabilité actuelle de N dans l'environnement des racines.

**Tableau 1a. Besoins en éléments nutritifs, résidus de récolte et besoins nets en éléments nutritifs de diverses cultures de légumes de plein champ.**

Culture: légumes de plein champ	Rende- ment (kg/a)	Besoins bruts en éléments nutritifs (kg/ha) = norme pour le calcul de la fertilisation P, K et Mg basée sur les analyses de terre				Teneur des résidus de récolte en éléments nutritifs (kg/ha)					Besoins nets en éléments nutritifs (kg/ha) = norme pour le calcul simplifié de Suisse-Bilanz			
		N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg	N <sub>disp</sub> *	N <sub>util</sub> **	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg	N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg
<b>Brassicacées</b>														
Chou-fleur	350	300	43,6 (100)	348,5 (420)	30	200	40	26,2 (60)	249 (300)	20	260	17,5 (40)	99,6 (120)	10
Chou-navet	400	160	21,8 (50)	182,6 (220)	40	60	10	8,7 (20)	83 (100)	20	150	13,1 (30)	99,6 (120)	20
Brocoli	180	250	21,8 (50)	141,1 (170)	20	150	30	8,7 (20)	66,4 (80)	10	220	13,1 (30)	74,7 (90)	10
Chou de Chine	600	180	39,3 (90)	249 (300)	30	80	20	13,1 (30)	83 (100)	20	160	26,2 (60)	166 (200)	10
Chou, culture précoce	300	160	34,9 (80)	215,8 (260)	20	100	20	17,5 (40)	91,3 (110)	10	140	17,5 (40)	124,5 (150)	10
Chou de garde	500	220	43,6 (100)	273,9 (330)	30	150	30	21,8 (50)	107,9 (130)	10	190	21,8 (50)	166 (200)	20
Chou à choucroute	800	300	52,4 (120)	332 (400)	40	200	40	26,2 (60)	124,5 (150)	20	260	26,2 (60)	207,5 (250)	20
Chou-pomme	300	140	26,2 (60)	149,4 (180)	30	40	10	8,7 (20)	49,8 (60)	10	130	17,5 (40)	99,6 (120)	20
Chou-pomme, transformation	450	180	34,9 (80)	190,9 (230)	40	50	10	13,1 (30)	66,4 (80)	10	170	21,8 (50)	124,5 (150)	30
Radis, 10 bottes/m <sup>2</sup>	300	50	8,7 (20)	66,4 (80)	10	0	0	0	0	0	50	8,7 (20)	66,4 (80)	10
Radis long, 8-9 pces/m <sup>2</sup>	400	120	21,8 (50)	182,6 (220)	20	40	10	4,4 (10)	58,1 (70)	10	110	17,5 (40)	124,5 (150)	10
Chou de Bruxelles	250	300	48,0 (110)	307,1 (370)	20	200	40	26,2 (60)	166 (200)	15	260	21,8 (50)	141,1 (170)	5
Navet, rave printemps/automne	400	150	21,8 (50)	207,50 (250)	30	60	10	8,7 (20)	83 (100)	10	140	13,1 (30)	124,5 (150)	20
Chou frisé, léger	300	140	17,5 (40)	199,2 (240)	20	100	20	4,4 (10)	83 (100)	10	120	13,1 (30)	116,2 (140)	10
Chou frisé, lourd	400	170	26,2 (60)	232,4 (280)	20	150	30	8,7 (20)	99,6 (120)	10	140	17,5 (40)	132,8 (160)	10
Cima di rapa	400	170	26,2 (60)	232,4 (280)	20	150	30	8,7 (20)	99,6 (120)	10	140	17,5 (40)	132,8 (160)	10
Roquette, une coupe	200	150	13,1 (30)	124,5 (150)	10	0	0	0	0	0	150	13,1 (30)	124,5 (150)	10
Roquette, deux coupes	300	210	17,5 (40)	149,4 (180)	20	0	0	0	0	0	210	17,5 (40)	149,4 (180)	20

\*  $N_{\text{disponible}}$  \*\*  $N_{\text{utilisable}}$

Tableau 1a (suite)														
Culture: légumes de plein champ	Rende- ment (kg/a)	Besoins bruts en éléments nutritifs (kg/ha) = norme pour le calcul de la fertilisation P, K et Mg basée sur les analyses de terre				Teneur des résidus de récolte en éléments nutritifs (kg/ha)					Besoins nets en éléments nutritifs (kg/ha) = norme pour le calcul simplifié de Suisse-Bilanz			
		N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg	N <sub>disp</sub> *	N <sub>util</sub> **	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg	N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg
<b>Astéracées</b>														
Endive, culture de racines	400	80	26,2 (60)	207,5 (250)	50	50	10	4,4 (10)	83 (100)	20	70	21,8 (50)	124,5 (150)	30
Chicorée rouge, Cicorino rosso,	160	120	17,5 (40)	116,2 (140)	20	40	10	8,7 (20)	41,5 (50)	10	110	8,7 (20)	74,7 (90)	10
Chicorée scarole	350	140	17,5 (40)	166 (200)	30	60	10	4,4 (10)	33,2 (40)	10	130	13,1 (30)	132,8 (160)	20
Chicorée scarole	600	180	21,8 (50)	207,5 (250)	30	100	20	4,4 (10)	41,5 (50)	10	160	17,4 (40)	166 (200)	20
Salades, diverses	350	100	17,5 (40)	99,6 (120)	20	40	10	8,7 (20)	41,5 (50)	10	90	8,7 (20)	58,1 (70)	10
Salades, diverses	600	120	21,8 (50)	149,4 (180)	20	50	10	4,4 (10)	49,8 (60)	10	110	17,5 (40)	99,6 (120)	10
Laitue à tondre	150	60	13,1 (30)	83 (100)	20	20	0	4,4 (10)	33,2 (40)	0	60	8,7 (20)	49,8 (60)	20
Scorsonère	250	130	17,5 (40)	124,5 (150)	20	60	10	4,4 (10)	41,5 (50)	10	120	13,1 (30)	83 (100)	10
Chicorée pain de sucre	350	140	21,8 (50)	149,4 (180)	30	60	10	13,1 (30)	74,7 (90)	20	130	8,7 (20)	74,7 (90)	10
Chicorée pain de sucre, convenience	600	170	21,8 (50)	149,4 (180)	30	60	10	13,1 (30)	74,7 (90)	20	160	8,7 (20)	74,7 (90)	10
<b>Apiacées</b>														
Fenouil	400	180	21,8 (50)	232,4 (280)	30	100	20	8,7 (20)	83 (100)	10	160	13,1 (30)	149,4 (180)	20
Carotte parisienne	250	60	17,5 (40)	132,8 (160)	20	40	10	4,4 (10)	49,8 (60)	10	50	13,1 (30)	83 (100)	10
Carotte précoce, en bottes	350	100	21,8 (50)	149,4 (180)	30	20	0	4,4 (10)	33,2 (40)	10	100	17,5 (40)	116,2 (140)	20
Carotte de garde, de transformation	600	120	26,2 (60)	315,4 (380)	30	70	10	8,7 (20)	107,9 (130)	10	110	17,5 (40)	207,5 (250)	20
Carotte de garde, de transformation	900	150	30,5 (70)	377,6 (455)	30	100	20	8,7 (20)	128,6 (155)	10	130	21,8 (50)	249 (300)	20
Persil	250	100	17,5 (40)	132,8 (160)	20	20	0	4,4 (10)	33,2 (40)	0	100	13,1 (30)	99,6 (120)	20
Céleri pomme	600	210	39,3 (90)	415 (500)	40	100	20	8,7 (20)	166 (200)	20	190	30,5 (70)	249 (300)	20
Céleri branche	600	200	34,9 (80)	332 (400)	30	80	20	4,4 (10)	83 (100)	10	180	30,5 (70)	249 (300)	20
<b>Chénopodiacées</b>														
Côte de bette	1000	160	34,9 (80)	249 (300)	50	40	10	8,7 (20)	66,4 (80)	20	150	26,2 (60)	182,6 (220)	30
Betterave à salade	600	150	21,8 (50)	182,6 (220)	40	60	10	4,4 (10)	49,8 (60)	20	140	17,5 (40)	132,8 (160)	20
Épinard non hivernant, semis avant mi-avril, une coupe	120	170	10,9 (25)	166 (200)	20	40	10	2,2 (5)	41,5 (50)	5	160	8,7 (20)	124,5 (150)	15
Épinard non hivernant, semis après mi-avril, une coupe	120	140	10,9 (25)	166 (200)	20	40	10	2,2 (5)	41,5 (50)	5	130	8,7 (20)	124,5 (150)	15

\* N<sub>disponible</sub> \*\* N<sub>utilisable</sub>

Tableau 1a (suite)

Culture: légumes de serre et de tunnel haut	Rende- ment (kg/a)	Besoins bruts en éléments nutritifs (kg/ha) = norme pour le calcul de la fertilisation P, K et Mg basée sur les analyses de terre				Teneur des résidus de récolte en éléments nutritifs (kg/ha)					Besoins nets en éléments nutritifs (kg/ha) = norme pour le calcul simplifié de Suisse-Bilanz			
		N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg	N <sub>disp</sub> *	N <sub>util</sub> **	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg	N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg
Épinard hivernant, une coupe	120	190	10,9 (25)	166 (200)	20	40	10	2,2 (5)	41,5 (50)	5	180	8,7 (20)	124,5 (150)	15
Épinard, deux coupes	200	160	26,2 (60)	199,2 (240)	30	60	10	8,7 (20)	49,8 (60)	10	150	17,5 (40)	149,4 (180)	20
<b>Fabacées</b>														
Haricot nain, récolte manuelle	150	30	26,2 (60)	166 (200)	10	150	30	17,5 (40)	107,9 (130)	5	0	8,7 (20)	58,1 (70)	5
Haricot, transfor- mation	90	20	17,5 (40)	124,5 (150)	10	140	20	13,1 (30)	99,6 (120)	5	0	4,4 (10)	24,9 (30)	5
Pois, transformation	70	20	24,0 (55)	174,3 (210)	20	120	20	15,3 (35)	124,5 (150)	15	0	8,7 (20)	49,8 (60)	5
Pois frais, pois mangetout	100	0	21,8 (50)	174,3 (210)	20	40	0	8,7 (20)	83 (100)	10	0	13,1 (30)	91,3 (110)	10
Engrais verts fabacées	300	0	0	0	0	50	0	8,7 (20)	41,5 (50)	10	0	0	0	0
<b>Cucurbitacées</b>														
Concombre à vinaigre	300	150	21,8 (50)	207,5 (250)	30	60	10	8,7 (20)	66,4 (80)	10	140	13,1 (30)	141,1 (170)	20
Melon	400	150	21,8 (50)	207,5 (250)	60	60	10	8,7 (20)	66,4 (80)	20	140	13,1 (30)	141,1 (170)	40
Courgette, courge, pâtisson	500	150	13,1 (30)	124,5 (150)	10	100	20	4,4 (10)	41,5 (50)	0	130	8,7 (20)	83 (100)	10
<b>Solanacées</b>														
Aubergine	400	190	21,8 (50)	166 (200)	30	80	20	13,1 (30)	58,1 (70)	20	170	8,7 (20)	107,9 (130)	10
Tomate <sup>1</sup>	800	130	21,8 (50)	215,8 (260)	30	0	0	0	0	0	130	21,8 (50)	215,8 (260)	30
<b>Liliacées</b>														
Poireau	500	220	30,5 (70)	232,4 (280)	30	100	20	13,1 (30)	83 (100)	10	200	17,5 (40)	149,4 (180)	20
Ciboulette	300	180	17,5 (40)	149,4 (180)	30	60	10	4,4 (10)	49,8 (60)	10	170	13,1 (30)	99,6 (120)	20
Asperge blanche <sup>1</sup>	50	140	13,1 (30)	107,9 (130)	20	0	0	0	0	0	140	13,1 (30)	107,9 (130)	20
Asperge verte <sup>1</sup>	25	150	13,1 (30)	91,3 (110)	20	0	0	0	0	0	150	13,1 (30)	91,3 (110)	20
Oignon	600	130	26,2 (60)	132,8 (160)	20	0	0	0	0	0	130	26,2 (60)	132,8 (160)	20
<b>Divers</b>														
Engrais verts hors fabacées	400	30	0	0	0	20	0	8,7 (20)	41,5 (50)	10	30	0	0	0
Herbes aromatiques, petites	50	40	6,5 (15)	49,8 (60)	10	0	0	0	0	0	40	6,5 (15)	49,8 (60)	10
Herbes aromatiques, moyennes	150	70	17,5 (40)	157,7 (190)	25	0	0	4,4 (10)	24,9 (30)	10	70	13,1 (30)	132,8 (160)	15
Herbes aromatiques, moyennes à grandes	300	120	24,0 (55)	203,3 (245)	35	0	0	6,5 (15)	37,3 (45)	15	120	17,5 (40)	166 (200)	20
Herbes aromatiques, grandes	500	170	30,5 (70)	257,3 (310)	45	40	10	8,7 (20)	49,8 (60)	20	160	21,8 (50)	207,5 (250)	25

<sup>1</sup> Les résidus de récolte sont en général évacués.

\* N<sub>disponible</sub> \*\* N<sub>utilisable</sub>



Tableau 1a (suite)

Culture: légumes de plein champ	Rende- ment (kg/a)	Besoins bruts en éléments nutritifs (kg/ha) = norme pour le calcul de la fertilisation P, K et Mg basée sur les analyses de terre				Teneur des résidus de récolte en éléments nutritifs (kg/ha)					Besoins nets en éléments nutritifs (kg/ha) = norme pour le calcul simplifié de Suisse-Bilanz			
		N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg	N <sub>disp</sub> *	N <sub>util</sub> **	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg	N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg
Mâche	100	50	8,7 (20)	49,8 (60)	10	0	0	0	0	0	50	8,7 (20)	49,8 (60)	10
Rhubarbe	450	140	21,8 (50)	182,6 (220)	30	60	10	8,7 (20)	83 (100)	20	130	13,1 (30)	99,6 (120)	10
Maïs sucré	180	150	34,9 (80)	215,8 (260)	30	0	0	13,1 (30)	132,8 (160)	10	150	21,8 (50)	83 (100)	20
<b>Valeur moyenne légumes de plein champ</b>		<b>130</b>	<b>19,6 (45)</b>	<b>153,5 (185)</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>10</b>	<b>6,5 (15)</b>	<b>53,9 (65)</b>	<b>10</b>	<b>120</b>	<b>13,1 (30)</b>	<b>99,6 (120)</b>	<b>15</b>

\* N<sub>disponible</sub> \*\* N<sub>utilisable</sub>

Tableau 1b. Besoins en éléments nutritifs, résidus de récolte et besoins nets en éléments nutritifs de diverses cultures de légumes sous serre et tunnel.

Culture: légumes de serre et de tunnel haut	Rende- ment (kg/a)	Besoins bruts en éléments nutritifs (kg/ha) = norme pour le calcul de la fertilisation P, K et Mg basée sur les analyses de terre				Teneur des résidus de récolte en éléments nutritifs (kg/ha)					Besoins nets en éléments nutritifs (kg/ha) = norme pour le calcul simplifié de Suisse-Bilanz			
		N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg	N <sub>disp</sub> *	N <sub>util</sub> **	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg	N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg
Aubergine, culture en sol	900	200	43,6 (100)	290,5 (350)	50	0	0	0	0	0	200	43,6 (100)	290,5 (350)	50
Haricot à rames <sup>a</sup>	500	0–40	34,9 (80)	149,4 (180)	30	40	0	0	0	0	40	34,9 (80)	149,4 (180)	30
Scarole d'automne	450	140	21,8 (50)	149,4 (180)	30	0	0	0	0	0	140	21,8 (50)	149,4 (180)	30
Concombre, culture en sol, 30 pces/m <sup>2</sup>	1500	200	43,6 (100)	249 (300)	60	0	0	0	0	0	200	43,6 (100)	249 (300)	60
Concombre, culture en sol, 50 pces/m <sup>2</sup>	2500	300	65,4 (150)	332 (400)	80	0	0	0	0	0	300	65,4 (150)	332 (400)	80
Chou-pomme	450	140	26,2 (60)	166 (200)	30	0	0	0	0	0	140	26,2 (60)	166 (200)	30
Côte de bette	900	200	43,6 (100)	332 (400)	50	0	0	0	0	0	200	43,6 (100)	332 (400)	50
Cresson <sup>a</sup>	130	20	4,4 (10)	24,9 (30)	10	0	0	0	0	0	20	4,4 (10)	24,9 (30)	10
Poireau	500	160	26,2 (60)	(220)	30	0	0	0	0	0	160	26,2 (60)	182,6 (220)	30
Mâche <sup>a</sup>	120	50	4,4 (10)	49,8 (60)	10	0	0	0	0	0	50	4,4 (10)	49,8 (60)	10
Poivron, culture en sol	600	160	21,8 (50)	207,5 (250)	30	0	0	0	0	0	160	21,8 (50)	207,5 (250)	30
Persil	300	100	21,8 (50)	149,4 (180)	20	0	0	0	0	0	100	21,8 (50)	149,4 (180)	20
Pourpier	150	70	8,7 (20)	74,7 (90)	20	0	0	0	0	0	70	8,7 (20)	74,7 (90)	20

\* N<sub>disponible</sub> \*\* N<sub>utilisable</sub><sup>a</sup> On peut renoncer complètement à une fertilisation azotée après une culture produisant un arrière-effet azoté.<sup>b</sup> Si les rendements sont plus élevés, augmenter proportionnellement la fertilisation.

Tableau 1b (suite)

Culture: légumes de serre et de tunnel haut	Rende- ment (kg/a)	Besoins bruts en éléments nutritifs (kg/ha) = norme pour le calcul de la fertilisation P, K et Mg basée sur les analyses de terre				Teneur des résidus de récolte en éléments nutritifs (kg/ha)					Besoins nets en éléments nutritifs (kg/ha) = norme pour le calcul simplifié de Suisse-Bilanz			
		N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg	N <sub>disp</sub> *	N <sub>util</sub> **	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg	N	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg
Radis, 20 bottes/m <sup>2</sup> a	400	60	13,1 (30)	83 (100)	20	0	0	0	0	0	60	13,1 (30)	83 (100)	20
Radis long, 18 pces/m <sup>2</sup>	600	90	21,8 (50)	166 (200)	30	0	0	0	0	0	90	21,8 (50)	166 (200)	30
Roquette, une coupe	200	150	13,1 (30)	124,5 (150)	10	0	0	0	0	0	150	13,1 (30)	124,5 (150)	10
Roquette, deux coupes	300	210	17,5 (40)	149,4 (180)	20	0	0	0	0	0	210	17,5 (40)	149,4 (180)	20
Salade pommée, iceberg, lollo	400	80	13,1 (30)	116,2 (140)	20	0	0	0	0	0	80	13,1 (30)	116,2 (140)	20
Ciboulette (une culture) c	300	100	17,5 (40)	149,4 (180)	30	0	0	0	0	0	100	17,5 (40)	149,4 (180)	30
Laitue à tondre	150	50	4,4 (10)	41,5 (50)	10	0	0	0	0	0	50	4,4 (10)	41,5 (50)	10
Céleri à soupe, 40 pces/m <sup>2</sup>	600	120	30,5 (70)	182,6 (220)	30	0	0	0	0	0	120	30,5 (70)	182,6 (220)	30
Épinard	120	100	13,1 (30)	116,2 (140)	20	0	0	0	0	0	100	13,1 (30)	116,2 (140)	20
Tomate, culture en sol	1200	170	34,9 (80)	282,2 (340)	60	0	0	0	0	0	170	34,9 (80)	282,2 (340)	60
Tomate, culture en sol	1800	250	43,6 (100)	415 (500)	80	0	0	0	0	0	250	43,6 (100)	415 (500)	80
Tomate, culture en sol	2400	330	69,8 (160)	564,4 (680)	120	0	0	0	0	0	330	69,8 (160)	564,4 (680)	120
Tomate, culture en sol	3000	400	87,3 (200)	705,4 (850)	150	0	0	0	0	0	400	87,3 (200)	705,4 (850)	150
Courgette, pâtisson	600	160	13,1 (30)	124,5 (150)	10	0	0	0	0	0	160	13,1 (30)	124,5 (150)	10
<b>Valeur moyenne serre</b>		<b>130</b>	<b>26,2 (60)</b>	<b>182,6 (220)</b>	<b>35</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>130</b>	<b>26,2 (60)</b>	<b>182,6 (220)</b>	<b>35</b>

\* N<sub>disponible</sub> \*\* N<sub>utilisable</sub>

c Forçage de ciboulette sans ajout de fertilisants.

### 3. Fertilisation azotée

#### 3.1 Dosage de la fertilisation azotée selon la méthode N<sub>min</sub>

Le tableau 1 présente les données chiffrées des besoins en N des diverses cultures de légumes. Les producteurs de légumes qui prennent en compte la quantité de N<sub>disp</sub> déjà présent dans le sol se basent sur les précieuses indications des analyses N<sub>min</sub> (tableau 2). Celles-ci donnent la quantité de N disponible pour les plantes dans le sol à un moment donné (Wonneberger et Keller 2004). La profondeur du prélèvement des échantillons est déterminée par la profondeur d'enracinement respective des différentes cultures (Gysi *et al.* 1997). Pour les espèces de légumes n'occupant qu'un volume restreint de sol et dont le système racinaire ne colonise que l'horizon superficiel, le pré-

lèvement se fait de 0 à 30 cm. Pour les espèces dont le système racinaire colonise profondément le sol, le prélèvement se fait de 0 à 60 cm. Pour disposer d'un échantillonnage représentatif, il faut prélever dans la parcelle au moins douze échantillons répartis en diagonales. La méthode N<sub>min</sub> ne donne des résultats fiables que si l'on respecte un délai d'au moins quatre semaines entre la dernière application de N et la prise d'échantillons.

Il faut éviter un réchauffement des échantillons N<sub>min</sub> déjà au champ en entreposant immédiatement les sachets remplis dans un contenant réfrigéré. S'il n'est pas possible d'amener les échantillons prélevés directement au laboratoire d'analyse, ils doivent être congelés afin d'empêcher que la minéralisation de N se poursuive dans les sachets.

Le résultat de l'analyse permet de calculer, en kg N/ha, la quantité de  $N_{\text{disp}}$  dans l'espace occupé par les racines. Cette valeur  $N_{\text{min}}$  est alors comparée à une valeur de référence pour le stade de développement actuel de la culture concernée (tableau 2), permettant ainsi de calculer la quantité de N à ajouter (= différence entre les deux valeurs). L'analyse  $N_{\text{min}}$  fournit une valeur instantanée et ne permet pas de prédire la minéralisation de N susceptible de se produire dans le cours ultérieur de la culture.

$$\text{Dosage de N (kg N/ha)} = N_{\text{min}} (\text{valeur de référence}) - N_{\text{min}} (\text{teneur du sol})$$

Le dosage de N basé sur les échantillons  $N_{\text{min}}$  doit être consigné dans Suisse-Bilanz et dans le plan de fertilisation.

**Tableau 2a. Fertilisation azotée selon les analyses  $N_{\text{min}}$  en cultures de légumes de plein champ.**

Les plannings recommandés d'analyses  $N_{\text{min}}$  sont surlignés de gris.

Culture (légume de plein champ)	Rendement kg/a	Besoin global en N kg N/ha	Profondeur d'échantillonnage <sup>2</sup> cm	Valeur de référence $N_{\text{min}}$ (kg N/ha)						
				Attention: ne demander les analyses $N_{\text{min}}$ qu'au plus tôt quatre semaines après la dernière fertilisation.						
				Semaine de culture						
				0 <sup>1</sup>	2	4	6	8	10	12
<b>Brassicacées</b>										
Chou-fleur	350	300	60	140	330	270	180	140	100	70
Chou-navet	400	160	60	–	190	170	120	80	50	30
Brocoli	180	250	60	140	280	220	160	110	60	–
Chou de Chine, semé	600	180	60	–	230	190	120	80	50	–
Chou de Chine, planté	600	180	60	110	200	150	80	50	–	–
Chou précoce sous voile	300	160	60	120	190	150	100	60	50	50
Chou de garde	500	220	60	140	240	190	130	60	50	50
Chou à choucroute	800	300	60	150	320	260	160	100	50	50
Chou-pomme	300	140	30	80	170	120	60	40	40	–
Chou-pomme, transformation	450	180	30	90	200	150	80	50	40	–
Radis, 10 bottes/m <sup>2</sup>	300	50	30	90	90	40	40	–	–	–
Radis long, 8-9 pces/m <sup>2</sup>	400	120	30	–	150	120	80	40	–	–
Chou de Bruxelles	250	300	60	140	320	250	180	100	50	50
Navet, rave print./automne	400	150	60	90	180	130	70	40	40	–
Chou frisé, léger	300	140	60	160	140	130	110	80	50	–
Chou frisé, lourd	400	170	60	180	160	140	120	100	80	60
Cima di rapa	400	170	60	180	160	140	120	100	80	60
Roquette, une coupe	200	150	30	100	160	150	120	90	70	50
Roquette, deux coupes	300	210	30	100	160	150	120	120	80	50
<b>Astéracées</b>										
Endive, racines	400	80	60	–	–	80	80	50	50	–
Chicorée rouge, Cicerino rosso, semés	160	120	60	–	160	130	100	80	60	40
Chicorée rouge, Cicerino rosso, plantés	160	120	30	80	140	110	80	40	–	–
Chicorée scarole semée	350	140	60	–	180	160	130	100	70	40
Chicorée scarole semée	600	180	60	–	220	200	160	120	80	50
Chicorée scarole plantée	350	140	30	80	170	140	110	80	40	–
Chicorée scarole plantée	600	180	30	100	190	160	130	100	50	–

<sup>1</sup> La valeur de référence  $N_{\text{min}}$  indique en début de culture une teneur suffisante jusqu'à la première fertilisation de couverture. Les analyses de terre  $N_{\text{min}}$  en début de culture ne devraient concerner que la profondeur de sol de 0–30 cm.

<sup>2</sup> Si l'on ne dispose que d'un échantillon de terre de 0–30 cm alors qu'une analyse de 0–60 cm est prescrite, on comptera à double la valeur de 0–30 cm. La couche de sol de 0–60 cm peut être évaluée sur un seul échantillon.

– Pas d'analyse  $N_{\text{min}}$  ni de fertilisation à ce moment.

Tableau 2a (suite)

Culture (légume de plein champ)	Rende- ment kg/a	Besoin global en N kg N/ha	Profon- deur d'échantil- lonage <sup>2</sup> cm	Valeur de référence N <sub>min</sub> (kg N/ha)						
				Attention: ne demander les analyses N <sub>min</sub> qu'au plus tôt quatre semaines après la dernière fertilisation.						
				Semaine de culture						
				0 <sup>1</sup>	2	4	6	8	10	12
Salades, diverses	350	100	30	100	130	70	40	40	–	–
Salades, diverses	600	120	30	100	130	70	40	40	–	–
Laitue à tondre	150	60	30	50	80	70	50	30	–	–
Scorsonère	250	130	60	–	170	170	160	160	150	140
Chicorée pain de sucre semée	350	140	60	–	180	160	130	100	70	40
Chicorée pain de sucre plantée	350	140	30	80	170	150	120	90	60	40
Chicorée pain de sucre plantée	600	170	30	100	190	170	140	110	70	40
<b>Apiacées</b>										
Fenouil semé	400	180	60	–	200	190	160	130	90	40
Fenouil planté	400	160	30	80	180	150	120	80	40	–
Carotte parisienne	250	60	60	–	90	90	70	50	30	30
Carotte précoce en bottes	350	100	60	–	–	130	120	80	40	30
Carotte de garde, de transformation	600	120	60	–	150	150	100	50	30	30
Carotte de garde, de transformation	900	150	60	–	180	170	120	70	30	30
Persil semé	250	100	60	–	–	–	150	140	130	120
Persil planté	250	100	30	60	150	140	130	120	110	100
Persil hivernant	150	100	30	60	120	110	100	90	F	100
Céleri pomme	600	200	60	100	190	180	170	120	100	80
Céleri branche	600	210	60	100	230	200	160	130	100	40
<b>Chénopodiacées</b>										
Côte de bette semée	1000	160	60	–	200	190	170	140	120	100
Côte de bette plantée	1000	160	60	70	180	170	150	130	110	100
Betterave à salade	600	150	60	–	–	180	160	140	120	100
Épinard non hivernant, semé avant mi-avril, une coupe	120	170	30	–	160	150	110	50	–	–
Épinard non hivernant, semé après mi-avril, une coupe	120	140	30	–	160	150	110	50	–	–
Épinard hivernant, une coupe	120	190	30	–	160 <sup>3</sup>	150	110	50	–	–
Épinard, deux coupes	200	160	30	–	160	150	110	110	110	50
<b>Fabacées</b>										
Haricot nain, récolte manuelle	150	0	30	30	30	30	30	30	–	–
Haricot, transformation	90	0	30	30	30	30	30	30	–	–
Pois, transformation	70	0	60	–	30	30	30	30	30	30
Pois frais, pois mangetout	100	0	60	–	30	30	30	30	30	–

<sup>1</sup> La valeur de référence N<sub>min</sub> indique en début de culture une teneur suffisante jusqu'à la première fertilisation de couverture. Les analyses de terre N<sub>min</sub> en début de culture ne devraient concerner que la profondeur de sol de 0–30 cm.

<sup>2</sup> Si l'on ne dispose que d'un échantillon de terre de 0–30 cm alors qu'une analyse de 0–60 cm est prescrite, on comptera à double la valeur de 0–30 cm. La couche de sol de 0–60 cm peut être évaluée sur un seul échantillon.

<sup>3</sup> Semaines après le début de la croissance au printemps.

– Pas d'analyse N<sub>min</sub> ni de fertilisation à ce moment.

F Valeur N<sub>min</sub> au printemps, au début de la végétation.

Tableau 2a (suite)

Culture (légume de plein champ)	Rende- ment kg/a	Besoin global en N kg N/ha	Profon- deur d'échantil- lonage <sup>2</sup> cm	Valeur de référence N <sub>min</sub> (kg N/ha)						
				Attention: ne demander les analyses N <sub>min</sub> qu'au plus tôt quatre semaines après la dernière fertilisation.						
				Semaine de culture						
				0 <sup>1</sup>	2	4	6	8	10	12
<b>Cucurbitacées</b>										
Concombre à vinaigre	300	150	30	100	180	160	130	100	70	50
Melon	400	150	30	100	180	160	130	100	70	50
Courgette, courge, pâtisson	500	150	60	100	180	140	120	100	80	50
<b>Solanacées</b>										
Aubergine	400	190	60	100	230	200	160	100	70	50
Tomate	800	130	60	100	140	120	100	80	80	50
<b>Liliacées</b>										
Poireau semé	500	220	60	–	–	–	260	220	180	150
Poireau planté	500	220	60	130	250	210	170	140	120	100
Poireau hivernant	200	170	60	100	170	160	150	120	F	120
Ciboulette semée	300	180	60	–	240	240	220	200	180	150
Ciboulette plantée	300	180	60	90	220	200	180	160	140	120
Asperge blanche	50	140	60	E	170	170	170	170	170	170
Asperge verte	25	150	60	E	180	180	180	180	130	100
Oignon semé	600	130	60	–	–	180	150	120	100	100
Oignon repiqué	600	130	60	–	170	140	110	70	50	–
Oignon hiverné	300	120	60	–	80	70	60	50	F	100
<b>Divers</b>										
Herbes aromatiques, petites	50	40	30	80	80	70	60	50	40	30
Herbes aromatiques, moyennes	150	70	30	90	120	110	90	70	50	30
Herbes aromatiques, moyennes à grandes	300	120	30	100	200	180	160	110	70	30
Herbes aromatiques, grandes	500	170	60	120	200	180	160	110	70	30
Mâche	100	50	30	–	–	80	70	50	30	30
Rhubarbe	450	140	60	–	E	170	–	–	–	–
Mais sucré	180	150	60	100	190	180	150	110	80	50

<sup>1</sup> La valeur de référence N<sub>min</sub> indique en début de culture une teneur suffisante jusqu'à la première fertilisation de couverture. Les analyses de terre N<sub>min</sub> en début de culture ne devraient concerner que la profondeur de sol de 0–30 cm.

<sup>2</sup> Si l'on ne dispose que d'un échantillon de terre de 0–30 cm alors qu'une analyse de 0–60 cm est prescrite, on comptera à double la valeur de 0–30 cm. La couche de sol de 0–60 cm peut être évaluée sur un seul échantillon.

– Pas d'analyse N<sub>min</sub> ni de fertilisation à ce moment.

F Valeur N<sub>min</sub> au printemps, au début de la végétation.

E Valeur N<sub>min</sub> après la récolte; répartir la fertilisation en deux apports. Pas de fertilisation N après fin juillet. Pour la rhubarbe et l'asperge verte, un apport partiel supplémentaire avant le début de la récolte.

**Tableau 2b. Fertilisation azotée selon les analyses  $N_{\min}$  en cultures de légumes sous serre et tunnel.**Le planning recommandé d'analyses  $N_{\min}$  est surligné de gris.

Culture Légumes sous serre et tunnel haut	Rendement kg/a	Besoin global en N kg N/ha	Profondeur d'échantillonnage <sup>2</sup> cm	Valeur de référence $N_{\min}$ (kg N/ha)						
				Attention: ne demander les analyses $N_{\min}$ qu'au plus tôt quatre semaines après la dernière fertilisation.						
				Semaine de culture						
				0 <sup>1</sup>	2	4	6	8	10	12
Aubergine	900	200	60	180	170	160	150	140	130	120
Haricot à rames	500	40	30	50	50	50	50	50	50	50
Scarole d'automne	450	140	30	90	180	150	120	80	50	–
Concombre, 30 pces/m <sup>2</sup>	1500	200	60	180	170	160	150	140	120	50
Concombre, 50 pces/m <sup>2</sup>	2500	300	60	180	170	160	150	140	120	120
Chou-pomme	450	140	30	170	190	140	90	50	–	–
Bette à côtes	900	200	60	160	240	220	200	170	140	100
Cresson	130	20	30	30	30	–	–	–	–	–
Poireau	500	160	30	100	210	230	200	160	100	50
Mâche semée	140	50	30	30	30	30	30	30	30	–
Mâche plantée	120	50	30	30	30	30	30	–	–	–
Poivron	600	160	60	110	210	200	190	180	160	140
Persil	300	100	30	70	150	140	130	120	110	90
Radis, 20 bottes/m <sup>2</sup>	400	60	30	100	80	60	40	–	–	–
Radis long, 18 pces/m <sup>2</sup>	600	90	30	130	120	100	80	60	40	–
Roquette, pourpier, une coupe	200	150	30	100	160	150	120	90	70	50
Roquette, pourpier, deux coupes	300	210	30	100	160	150	120	120	80	50
Salade pommée, iceberg, lollo	400	80	30	100	100	100	80	40	–	–
Ciboulette (culture)	300	100	30	90	130	120	110	100	90	80
Laitue à tondre	150	50	30	70	70	30	30	–	–	–
Céleri à soupe, 40 pces/m <sup>2</sup>	600	120	30	100	170	170	150	100	70	50
Épinard	120	100	30	100	140	130	120	100	80	50
Tomate	1200	170	60	160	150	140	130	120	110	50
Tomate	1800	250	60	160	150	140	130	120	110	100
Tomate	2400	330	60	160	150	140	130	120	110	100
Tomate	3000	400	60	160	150	140	130	120	110	100
Courgette, pâtisson	600	160	60	100	180	140	120	100	80	50

– Pas d'analyse  $N_{\min}$  ni de fertilisation à ce moment.<sup>1</sup> La valeur de référence  $N_{\min}$  en début de culture montre une teneur suffisante jusqu'à la première fertilisation de couverture. Les analyses de terre  $N_{\min}$  en début de culture ne devraient concerner que la profondeur de sol de 0–30 cm.<sup>2</sup> Si l'on ne dispose que d'un échantillon de terre de 0–30 cm alors qu'une analyse de 0–60 cm est prescrite, on comptera à double la valeur de 0–30 cm. La couche de sol de 0–60 cm peut être évaluée sur un seul échantillon.**Rappel: Selon les prescriptions du label SUISSE GARANTIE et de l'association SwissGAP, aucun apport isolé de N de plus de 60 kg N/ha sous forme de nitrate n'est autorisé.**

### 3.2 Fertilisation azotée basée sur l'analyse de sève

L'analyse du nitrate de la sève peut être utile pour évaluer l'état actuel de l'alimentation azotée d'une culture. Cette méthode permet de décider rapidement s'il convient d'apporter une fertilisation de complément et dans quel ordre de grandeur. Comme il ne s'agit pas d'une méthode exacte dans le sens étroit du terme, elle n'est pas reconnue dans le cadre des prestations écologiques requises (PER), contrairement à la méthode  $N_{\min}$ , pour justifier des besoins de N dépassant la norme officielle.

## 4. Fertilisation en soufre

Jusqu'à récemment, les apports de soufre (S) atmosphérique permettaient de couvrir la plus grande part des besoins en S de la plupart des cultures de légumes. Comme cette source de S tend à faiblir (Sinaj *et al.* 2009), la substance organique du sol prend de plus en plus d'importance dans l'approvisionnement des plantes cultivées en S. Les sols organiques, ainsi que les surfaces sur lesquelles des engrais de ferme et des composts ont été régulièrement apportés, ont un meilleur potentiel de fourniture de soufre assimilable par les plantes. La minéralisation de la substance organique libère du N, du P ainsi que du S sous forme de sulfate.

### 4.1 Carence en soufre

S est impliqué dans divers processus métaboliques, entre autres dans la synthèse de la chlorophylle. D'autre part, S est un composant de divers acides aminés importants et d'autres substances constitutives des plantes tels les glucosinolates (Bergmann 1993). Ces derniers sont d'importants composants des arômes chez différentes espèces de choux ainsi que chez d'autres représentants de la famille des brassicacées. Chez des espèces de légumes tels les oignons, l'ail, les poireaux et les asperges, ce sont également des composés soufrés qui déterminent en grande partie le goût et l'arôme puissant des produits récoltés.

Les symptômes visibles d'une carence en S sont des feuilles vert pâle à jaunes, dont les nervures aussi finissent par jaunir. La carence en S s'observe d'abord sur les jeunes feuilles.

### 4.2 Besoins en soufre des cultures de légumes

Les espèces cultivées qui sont de loin les plus exigeantes en S sont celles appartenant à la famille des brassicacées (espèces de choux, radis et radis longs, roquette, raifort), avec des prélèvements pouvant atteindre 80 kg S par ha. Les espèces de la famille des liliacées (oignon, ail, poireau) présentent également des besoins élevés en S, de même que les espèces de fabacées (haricot, pois). Par contre, les salades de la famille des astéracées présentent des besoins en S comparativement faibles (Bergmann 1993).

En général et comparées aux cultures d'été et d'automne, les cultures précoces ont des exigences plus élevées en matière d'approvisionnement en S. Dans les régions soumises

à une fréquence moyenne à grande de précipitations, une grande partie du sulfate assimilable par les plantes encore présente dans l'horizon superficiel du sol est entraînée vers les horizons inférieurs du sol dans la période de repos végétatif. Les racines de la plupart des espèces de légumes n'ont alors plus la possibilité de l'absorber au printemps suivant. La mobilisation du S contenu dans la matière organique ne commence que tardivement au début de la période de végétation, alors que les températures du sol sont encore basses. C'est pourquoi les carences d'approvisionnement en S apparaissent principalement au printemps chez les espèces présentant des besoins moyens à élevés en S. Les plus menacées sont les cultures hâtées sous bâches à plat.

Au printemps, les symptômes de carence sont particulièrement marqués chez les espèces hivernées tels le chou-fleur, l'oignon et l'ail. En valeur absolue, l'épinard n'exige que peu de S mais il n'est pas rare que l'on observe au printemps des chloroses bien évidentes sur l'épinard hiverné (Reif *et al.* 2012). Au printemps, le sulfate apporté avec la fertilisation de fond l'année précédente n'est plus guère assimilable par les cultures hivernées. C'est pourquoi il faut utiliser de nouveau, avant le départ en végétation, des engrais contenant du S.

### 4.3 Application d'engrais contenant du soufre

Divers essais réalisés par Agroscope en cultures précoces d'espèces de légumes exigeantes en S montrent que la carence en S peut être totalement évitée par l'application des éléments nutritifs principaux P, K et Mg sous forme d'engrais contenant du sulfate (superphosphate, sulfate de potassium, sulfate de magnésium etc.) (voir aussi chapitre 4.2, module 4). D'autre part, on peut aussi utiliser le sulfate d'ammonium ou l'engrais ENTEC®, qui contiennent du S, pour prévenir la carence en S.

Dans les essais portant sur l'alimentation en S du chou-rave précoce, l'application d'une fertilisation de fond contenant du S a donné un rendement commercialisable de bulbes avec feuillage pouvant dépasser de 85% celui d'une fertilisation sans S. On a constaté que l'apport de 75 kg S/ha s'avérait suffisant. Si les besoins en P, K et Mg sont couverts avec des engrais contenant du sulfate, les besoins en S sont entièrement couverts même pour les espèces très exigeantes de choux. Chez l'épinard d'hiver, on peut éviter totalement les chloroses nuisibles à la qualité par des apports de S de l'ordre de 10 kg S/ha, au printemps et avant le début de la végétation.

## 5. Rôle de l'approvisionnement en oligo-éléments

Un apport ciblé d'oligo-éléments s'impose sur les sols naturellement pauvres en ces éléments ou sur ceux dans lesquels certains oligo-éléments sont peu assimilables en raison d'un pH basique ou acide (tableau 3). Il faut penser aussi que, dans des conditions défavorables de pH, une grande partie des oligo-éléments apportés dans le sol via la fertilisation sont rapidement fixés et donc peu assimi-

Tableau 3. Rôle et utilisation des oligo-éléments en cultures de légumes.

Élément	Cultures ayant des besoins élevés	Formes fréquentes d'apport	Consignes d'utilisation
Fer (Fe)	Diverses cultures précoces sur sols lourds, basiques, tendant par moments à la saturation d'eau.	Sulfate de fer, chélate de fer	L'efficacité du sulfate de fer est fortement réduite lorsque les valeurs de pH sont dans la zone alcaline.
Manganèse (Mn)	Oignon, pomme de terre, haricot. Concombre, épinard, salades sur sols alcalins.	Sulfate de manganèse, chélate de manganèse	L'apport de sulfate de manganèse par le sol est peu efficace lorsque les valeurs de pH sont dans la zone neutre à alcaline. L'assimilabilité du Mn est par contre nettement meilleure lorsque les valeurs de pH sont dans la zone acide. Une toxicité du Mn peut se présenter dans les sols lourds à grandes réserves de Mn. L'humidité stagnante favorise encore plus la solubilité du Mn.
Bore (B)	Betterave à salade, céleri pomme, épinard, bette à tondre, chou-fleur, brocoli, chou-rave sur sols alcalins en situation de sécheresse.	Borax ou acide borique	Apport sous forme de fertilisation foliaire en situation de pH élevé, de sécheresse durable et comme mesure corrective d'urgence.
Zinc (Zn)	Les cultures les plus sensibles à la carence en Zn sont le haricot, l'oignon et l'épinard.	Sulfate de zinc, chélate de zinc	Les symptômes de carence en Zn se manifestent rarement dans les cultures de légumes. Un apport spécial de Zn se justifie donc rarement.
Molybdène (Mo)	Le chou-fleur est typiquement une culture indicatrice de carence en Mo. Cette carence peut apparaître aussi occasionnellement chez d'autres espèces de choux. La carence en Mo apparaît surtout dans des sols acides.	Molybdate de sodium et d'ammonium	Sur sols acides, en fertilisation foliaire chez le chou-fleur pour compenser une carence aiguë en Mo.

lables par les plantes (Schachtschabel *et al.* 1984). Dans les sols acides, il est possible d'améliorer à terme et durablement la disponibilité des éléments nutritifs par l'utilisation d'engrais calcaires ou par un chaulage (chapitre 5, module 2).

Les engrais contenant du fer (Fe), du manganèse (Mn) et du zinc (Zn) en chélates (sous forme ionique, ces oligo-éléments sont inclus dans une «enveloppe» organique, le chélate) fournissent ces éléments sous une forme facilement assimilable pour les plantes (Odet *et al.* 1982). En effet, cette formulation empêche la fixation de l'oligo-élément concerné à la phase solide du sol. Les formes de chélates suffisamment stables dans les sols à pH élevé sont relativement coûteuses. Leur utilisation ne se justifie économiquement que pour des cultures de légumes offrant une valeur ajoutée moyenne à grande.

L'apport d'oligo-éléments en fertilisation foliaire est souvent la mesure la plus efficace pour corriger à court terme des situations de carence. Il y a peu de marge entre carence et excès d'oligo-éléments (Trott 2013). L'utilisation inappropriée d'engrais contenant des oligo-éléments peut aboutir rapidement à une situation d'excès se traduisant par des dommages à la culture. C'est pourquoi il convient d'observer les consignes d'utilisation des fabricants dans les apports d'engrais contenant des oligo-éléments.

## 6. Fertilisation foliaire

Les feuilles peuvent absorber par leurs micropores les éléments nutritifs dissous dans un film d'eau superficiel. La rapidité d'absorption et la part absorbée des éléments nutritifs apportés dépendent des facteurs principaux suivants:

1. Type et formulation de l'élément nutritif.
2. Persistance et répartition de la solution nutritive sur la surface du végétal.
3. Capacité d'absorption des organes végétaux traités. Elle dépend principalement de la structure foliaire propre à l'espèce (épaisseur de la cuticule), de l'âge des feuilles et des conditions d'humidité régnant avant le traitement.
4. Hygrométrie durant et après l'application ainsi qu'éventuelles précipitations après l'application (durée de l'humectation).

Les éléments nutritifs appliqués sur le feuillage ne sont pas fixés à la phase solide du sol. Ils ne doivent pas parvenir préalablement aux racines de la plante, ni être absorbés par celles-ci. Les engrais foliaires sont absorbés plus rapidement que ceux apportés par application au sol. Dans le cas de la fertilisation foliaire, il faut savoir qu'une très petite part des besoins globaux de la plante est fournie en une seule application. La fertilisation foliaire convient donc surtout comme mesure corrective en cas de situations temporaires de carence.

La tolérance des plantes aux mesures de fertilisation foliaire dépend largement de la concentration d'application et des conditions météorologiques peu avant et après le traitement. Lorsqu'un temps chaud et sec fait suite à des périodes humides, la plupart des cultures de légumes présentent une grande sensibilité à l'application d'engrais foliaires. Il est recommandé de renoncer à la fertilisation foliaire, ou de réduire la concentration du produit dans de telles situations. Les traitements doivent être appliqués autant que possible durant les heures fraîches du soir.



Si les engrais foliaires sont appliqués en mélange avec une bouillie de produits phytosanitaires, il faut préalablement vérifier la miscibilité de l'engrais avec les produits utilisés. Si la miscibilité n'est pas assurée, la bouillie présentera rapidement des floculations. D'une façon générale, l'apport d'engrais foliaire combiné avec des produits phytosanitaires comporte un risque accru de dégâts aux cultures par phytotoxicité. Dans tous les cas, il convient de respecter les consignes d'utilisation données par les fabricants.

## 7. Utilisation d'engrais de recyclage

Parmi les engrais de recyclage, le compost et les digestats solides prennent de plus en plus d'importance dans le maraîchage de plein champ. Le principal effet que l'on en attend sur les parcelles de culture de légumes n'est pas lié à l'apport immédiat d'éléments nutritifs mais à l'amélioration de la qualité et de la fertilité des sols. L'apport de substance organique contribue à l'amélioration de la structure des sols, en particulier celle des sols argileux. Divers essais, menés principalement en cultures d'arbustes à baies, ont montré d'autre part que le compost peut stimuler les antagonistes microbiens naturels de divers pathogènes transmis par le sol. Lors de l'acquisition d'engrais de recyclage, il convient d'être très attentif à leur qualité.

La limite d'apport d'engrais de recyclage est fixée à 25 t/ha de compost ou de digestat solide (rapportées à la substance sèche) ou 200 m<sup>3</sup>/ha de digestat liquide en l'espace de trois ans, pour autant que les besoins des plantes en N et en P ne soient pas dépassés.

La limite d'apport d'amendements organiques et organominéraux, de compost ou de digestats solides en tant qu'amendements ou substrats, aux fins de protection contre l'érosion ou en tant que terreaux artificiels, est fixée à 100 t/ha dans l'espace de dix ans (ORRChim 2005, annexe 2.6, chapitre 3.2.2 compost et digestats).

Les engrais de ferme et de recyclage doivent être, autant que possible, utilisés dans des cultures autres que maraîchères et précédant ces dernières, et respectivement avant le travail profond du sol. On exclura ainsi d'éventuels effets négatifs temporaires sur le développement des cultures ainsi que des soucis quant à l'hygiène.

## 8. Conclusion

La réussite des cultures maraîchères, en particulier concernant la qualité des récoltes, dépend largement d'un approvisionnement équilibré en éléments nutritifs. Il faut souligner que sous cet aspect, les conditions défavorables du sol (colmatage, engorgement, etc.) peuvent aussi entraîner des blocages du développement des plantes et des chloroses. Ces causes peuvent être facilement confondues avec des carences. Il faut aussi garder à l'esprit l'action éventuelle de pathogènes transmis par le sol, dont l'occurrence peut être limitée au mieux par une rotation de grande amplitude.

## 9. Bibliographie

- Bergmann W., 1993. Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. Gustav Fischer Verlag, Jena-Stuttgart. 835 p.
- Crüger G., 1982. Pflanzenschutz im Gemüsebau – Handbuch des Erwerbsgärtners. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart. 422 p.
- Finck A., 1979. Dünger und Düngung – Grundlagen und Anleitung zur Düngung der Kulturpflanzen. Verlag Chemie Weinheim, New York. 442 p.
- Gysi C., Ryser J.-P. & Heller W., 1997. Bodenuntersuchung im Gemüsebau. Flugschrift der Eidg. Forschungsanstalt Wädenswil Nr. 122. 24 p.
- Gysi C., Ryser J.-P., Matthäus D., Koch W., Wigger A. & Berner A., 2001. Fumure. Manuel des légumes édité par l'Union maraîchère suisse, Berne, p. 55–88.
- Holtschulze M., 2005. Tip burn in head lettuce – the role of calcium and strategies to prevent the disorder. Inaugural-Dissertation. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn. 107 S.
- Krug H., 1991. Gemüseproduktion. Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg. 541 p.
- Neuweiler R., Krauss J., Konrad P. & Imhof T., 2008. Chicorée - die Wurzel richtig versorgen. Gemüse, das Magazin für den professionellen Gemüsebau 3, 10–12.
- Odet J., Musard M. & Wacquet C., 1982. Mémento fertilisation des cultures maraîchères. Edition réalisée par Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes, Paris. 398 p.
- ORRChim, 2005. Ordonnance sur la réduction des risques liés à l'utilisation de substances, de préparations et d'objets particulièrement dangereux (Ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques, ORRChim). Le Conseil fédéral suisse, Berne. Accès: <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/20021520/index.html> [4.11.2016].
- Reif C., Arrigoni E., Neuweiler R., Baumgartner D., Nyström L. & Hurrell R. H., 2012. Effect of Sulfur and Nitrogen Fertilization on the Content of Nutritionally Relevant Carotenoids in Spinach (*Spinacia oleracea*). Journal of Agricultural and Food Chemistry 60, 5819–5824.
- Schachtschabel P., Blume H.-P., Hartge K.-H. & Schwertmann U., 1984. Lehrbuch der Bodenkunde, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart. 442 p.
- Sinaj S., Richner W, Flisch R. et Charles R, 2009. Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages (DBF-GCH). Revue suisse d'Agriculture 41 (1), 1–98.
- Trott H., 2013. Mikronährstoffe in der Landwirtschaft und im Gartenbau, Bedeutung – Mangelsymptome – Düngung. Broschüre. Bundesarbeitskreis Düngung (BAD), Frankfurt am Main. 66 p.
- Vogel G., 1996. Handbuch des speziellen Gemüsebaues. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart. 1127 p.
- Wonneberger C. & Keller F., 2004. Gemüsebau. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart. 373 p.

## 10. Liste des tableaux

Tableau 1a. Besoins en éléments nutritifs, résidus de récolte et besoins nets en éléments nutritifs de diverses cultures de légumes de plein champ. ....	10/4
Tableau 1b. Besoins en éléments nutritifs, résidus de récolte et besoins nets en éléments nutritifs de diverses cultures de légumes sous serre et tunnel. ....	10/7
Tableau 2a. Fertilisation azotée selon les analyses $N_{\min}$ en cultures de légumes de plein champ. ....	10/9
Tableau 2b. Fertilisation azotée selon les analyses $N_{\min}$ en cultures de légumes sous serre et tunnel. ....	10/12
Tableau 3. Rôle et utilisation des oligo-éléments en cultures de légumes. ....	10/14



## 11/ Fertilisation des cultures maraîchères sur substrat

Céline Gilli et Christoph Carlen  
Agroscope, 1964 Conthey, Suisse

Renseignements: [celine.gilli@agroscope.admin.ch](mailto:celine.gilli@agroscope.admin.ch)

## Table des matières

1. Introduction .....	11/3
2. Recommandations pour la fertilisation .....	11/4
2.1 Systèmes ouverts et fermés .....	11/4
2.2 Composition de la solution nutritive .....	11/5
2.3 Adaptation de la solution nutritive .....	11/6
2.4 Apport de solution nutritive .....	11/6
3. Bibliographie.....	11/7
4. Liste des tableaux .....	11/8
5. Liste des figures .....	11/8

## 1. Introduction

En culture maraîchère sur substrat, la fertigation (fertilisation et irrigation) avec recyclage du drainage fournit à la plante un apport nutritionnel optimal et une utilisation très efficace de l'eau et des éléments nutritifs. La solution nutritive doit être équilibrée et adaptée à la croissance des cultures cultivées sur substrats. Le substrat fournit un support aux plantes et il sert, dans une certaine mesure, de réservoir dans lequel la plante puise les éléments nutritifs nécessaires à sa croissance. Il doit être perméable, bien aéré et durable (Göhler et Molitor 2002). Les matériaux utilisés aujourd'hui sont généralement organiques (écorce, fibre de bois ou de noix de coco, tourbe, etc.), ainsi ils peuvent être réutilisés ou recyclés. Mais des supports minéraux d'origine naturelle (laine de roche, perlite, Pouzzolane, etc.) sont également disponibles.

La composition des éléments dans la solution nutritive est complexe et joue un rôle important dans la réussite de la culture sur substrat, en particulier dans les systèmes avec recyclage du drainage (Pivot *et al.* 1999; Le Quilicq *et al.* 2002). La culture sur substrat présente les avantages suivants par rapport à une culture conventionnelle en sol: simplification des travaux de culture (récolte et pas de désherbage), augmentation du potentiel de rendement, meilleur contrôle de la précocité, moins de pertes de rendement induites par les rotations culturales insuffisantes, liées aux maladies du sol, aux ravageurs et au manque de fertilité des sols, ainsi que réduction des pertes en éléments nutritifs et en eau par le recyclage des eaux de drainage en système fermé.



Figure 1. Poivrons sur substrat (photo: Agroscope).



Figure 2. Les tomates sont les principaux légumes cultivés sur substrat en Suisse (photo: Agroscope).

Cette publication contient des recommandations pour la fertigation des cultures maraîchères suivantes sur substrat: tomates, concombres, aubergines, poivrons et laitues (Sonneveld 1989; Brajeul *et al.* 2001; Göhler et Molitor 2002; Pivot *et al.* 2005; Urban et Urban 2010; Sonneveld et Voogt 2009) (figures 1, 2 et 3).



Figure 3. Concombres sur substrat (photo: Agroscope).

## 2. Recommandations pour la fertilisation

### 2.1 Systèmes ouverts et fermés

Le système ouvert (SO) permet l'apport d'une solution nutritive fraîche à chaque irrigation. Les effluents doivent être récupérés pour fertiliser d'autres cultures. Cette réutilisation des rejets nécessite de connaître leur teneur en éléments fertilisants, elle doit se pratiquer d'après les données de base pour la fertilisation des différentes cultures.

Le système fermé (SF) permet au contraire un recyclage dynamique des rejets sur la culture en place. La composition

du drainage varie en fonction de l'absorption d'eau et de nutriments par les plantes. Il peut en résulter une accumulation de certains éléments, et par conséquent des déséquilibres nutritifs (Pivot et Gillioz 2004). Pour cette raison, une analyse complète de la solution nutritive doit être effectuée toutes les trois à quatre semaines environ. Le recyclage permet une économie importante en eau et en engrais. La nécessité de désinfecter le drainage à recycler dépend du risque de propagation des agents pathogènes. Sur les grandes exploitations, le drainage est généralement désinfecté (filtration lente, rayonnement UV, traitement à l'ozone, traitement au chlore, ultrafiltration, etc.) (Göhler et Molitor 2002).

Tableau 1. Masse molaire (MM) des éléments chimiques utilisés pour la préparation des solutions nutritives.

Elément	MM g/mol	Elément	MM g/mol	Elément	MM g/mol
N	14,00	O	16,00	Fe	55,85
P	30,97	H	01,00	Mn	54,90
S	32,06	C	12,01	B	10,81
K	39,10	Na	22,99	Cu	63,55
Ca	40,08	Cl	35,45	Mo	95,90
Mg	24,31			Si	28,09

Tableau 2. Compositions en éléments minéraux des solutions nutritives de diverses cultures maraîchères sur substrats organiques en système ouvert (SO) et fermé (SF) (Sonneveld et Straver 1994; Göhler et Molitor 2002; Pivot et al. 2005).

Système	Jeunes plants	Laitue	Aubergine		Concombre		Poivron		Tomate	
	SF	SF	SF	SO	SF	SO	SF	SO	SF	SO
EC mS/cm	2,40	2,60	1,70	2,10	1,70	2,20	1,60	2,10	1,60	2,60
pH	5,0–6,2	5,0–6,2	5,0–6,2	5,0–6,2	5,0–6,2	5,0–6,2	5,0–6,2	5,0–6,2	5,0–6,2	5,0–6,2
<b>Macro-éléments mmol/l</b>										
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	1,25	1,25	1,00	1,50	1,00	1,25	0,50	0,50	1,00	1,20
K <sup>+</sup>	6,75	11,00	6,50	6,75	6,50	8,00	5,75	6,75	6,50	9,50
Ca <sup>2+</sup>	4,50	4,50	2,25	3,25	2,75	4,00	3,50	5,00	2,75	5,40
Mg <sup>2+</sup>	3,00	1,00	1,50	2,50	1,00	1,38	1,13	1,50	1,00	2,40
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	16,75	19,00	11,75	15,50	11,75	16,00	12,50	15,50	10,75	16,00
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2,50	1,13	1,13	1,50	1,00	1,38	1,00	1,75	1,5	4,40
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	1,25	2,00	1,00	1,25	1,25	1,25	1,00	1,25	1,25	1,50
Si <sup>a</sup>	–	0,50	–	–	0,75	0,75	–	–	–	–
<b>Micro-éléments µmol/l</b>										
Fe	25	40	15	15	15	15	15	15	15	15
Mn	10	5	10	10	10	10	10	10	10	10
Zn	5	4	5	5	5	5	4	5	4	5
B	35	30	25	35	25	25	25	30	20	30
Cu	1,00	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Mo	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

<sup>a</sup> facultatif.

## 2.2 Composition de la solution nutritive

La solution nutritive contient non seulement des macro-éléments [azote (N), phosphore (P), soufre (S), potassium (K), calcium (Ca), magnésium (Mg)], mais aussi des oligo-éléments [fer (Fe), manganèse (Mn), zinc (Zn), bore (B), cuivre (Cu), molybdène (Mo)]. Elle doit être préparée en tenant compte de la composition en éléments nutritifs de l'eau d'irrigation. Il est possible que les quantités contenues dans l'eau couvrent ou dépassent les besoins de la culture en S, en Ca et en Mg. La composition minérale de l'eau dépend de son origine (source, eaux souterraines, lacs, etc.). Des variations considérables sur l'année sont également possibles. Une eau ayant une salinité inférieure à 0,5 mS/cm peut être utilisée sans problème. Au contraire, si la salinité excède 1 mS/cm, le recyclage est difficile à mettre en œuvre. La composition de la solution nutritive est exprimée en mole ou mmol (tableaux 1 et 2). La mole est la quantité d'une substance contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kg de carbone ( $^{12}\text{C}$ ). La masse molaire d'une substance, un ion ou un atome, correspond à la somme des masses atomiques présentes, exprimée en grammes. Une mole d'une substance, un ion ou un atome, contient le même nombre d'entités élémentaires.

Les produits utilisés pour la préparation des solutions nutritives peuvent être hydratés ou non, leur composition chimique peut varier. La densité et la pureté des acides peuvent également changer selon leur origine. Il est donc indispensable de vérifier leurs compositions lors du calcul de la solution nutritive. Il est également important de s'assurer de la qualité des produits utilisés, ceux-ci ne devant pas contenir trop d'impuretés, de précipités, de carbonates et d'hydroxydes afin d'éviter la formation de composés insolubles dans les bacs de solutions mères.

La concentration des solutions mères est généralement de 100 à 200 fois plus élevée que celle de la solution nutritive (tableau 3). Elle est souvent limitée par la solubilité des produits utilisés. La règle veut qu'on ne mélange pas dans le même bac des éléments contenant des sulfates ou des phosphates avec des engrais contenant du Ca, ceci pour éviter une précipitation. Au moins deux bacs de solutions mères sont préparés pour pouvoir séparer les éléments incompatibles (figure 4). Les acides peuvent être dilués dans un bac séparé, afin de faciliter la gestion du pH. L'ajout des oligo-éléments, excepté le Fe, se fait dans le bac contenant les phosphates et les sulfates.

Tableau 3. Préparation de la solution nutritive pour une culture de tomate sur substrat dans un système ouvert en considérant les teneurs en éléments fertilisants dans l'eau.

Pour une solution mère de 100 litres (concentration: 100 x) Engrais	Quantité d'éléments fertilisants		
	Récipient A	Récipient B	Récipient C
Hydrogénophosphate de potassium $\text{KH}_2\text{PO}_4$	2,04 kg		
Nitrate de magnésium $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	6,14 kg		
Mélange de micro-éléments	0,15 kg		
Nitrate d'ammonium $\text{NH}_4\text{NO}_3$ (Amnitra 18 %N)	0,53 l		
Sulfate de potasse $\text{K}_2\text{SO}_4$	6,96 kg		
Nitrate de calcium $5(\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) \cdot \text{NH}_4\text{NO}_3$		9,3 kg	
Acide nitrique $\text{HNO}_3$ - 60 % (d = 1,37)			4 l



Figure 4. Ordinateur pour mélanger et gérer la fertigation pour les cultures maraîchères sous serre (photo: Agroscope).

Tableau 4. Adaptation de la solution nutritive pendant les 4 à 8 premières semaines de culture. Différences par rapport aux concentrations recommandées pour ces cultures dans le tableau 2 (Pivot et al. 2005).

Élément mmol/l	Culture			
	Aubergine	Concombre	Poivron	Tomate
$\text{NH}_4^+$	+ 0,10	+ 0,10	+ 0,10	+ 0,10
$\text{K}^+$	- 1,00	- 1,00	- 1,00	- 1,00
$\text{Ca}^{2+}$	+ 0,45	+ 0,45	+ 0,45	+ 0,45
$\text{Mg}^{2+}$				+ 0,50
$\text{NO}_3^-$				+ 0,10

### 2.3 Adaptation de la solution nutritive

Pour favoriser la croissance et le développement optimal des cultures maraîchères cultivées sur substrat, les compositions proposées (tableau 2) doivent être adaptées selon les données du tableau 4 pour les quatre à huit premières semaines de culture. En particulier, la teneur en Ca est augmentée et celle en K est réduite. Ensuite, lorsque la charge en fruits est élevée, la teneur en potassium de la solution nutritive peut être augmentée durant de courtes périodes (environ une semaine) de 1 à 2 mmol/l sous forme de  $\text{KNO}_3$ . Pour corriger et adapter l'apport



Figure 5. Mesure du pH et de l'électroconductivité (EC) de la solution nutritive (photo: Agroscope).

nutritif, il est indispensable d'analyser régulièrement la composition de la solution nutritive apportée aux plantes. Habituellement, des analyses sont nécessaires dans les systèmes fermés toutes les trois à quatre semaines.

La mesure de l'électro-conductivité (EC) et du pH permettent un contrôle plus simple de l'eau de drainage (figure 5). L'EC du drainage est un indicateur de la concentration de la solution nutritive dans les substrats. Les valeurs comprises entre 2,5 et 4,0 mS/cm sont considérées comme normales. Elles peuvent aussi être plus élevées (5 mS/cm) selon l'état et la période de culture. En période de forte chaleur, la plante consomme plus d'eau et, en période de faible luminosité, plus d'éléments minéraux. En raison des fluctuations de concentration, l'EC du drainage doit être contrôlée tous les jours et la solution nutritive adaptée en conséquence. Le pH du drainage doit être compris entre 5,5 et 7,0.

Une autre façon de contrôler la fertilisation est d'analyser la concentration en macro-éléments et oligo-éléments des feuilles pleinement développées. Pour évaluer les analyses foliaires, les valeurs indicatives pour les tomates, les concombres et les poivrons sont données dans le tableau 5.

### 2.4 Apport de solution nutritive

L'apport de solution nutritive est modulé principalement en fonction du stade de végétation, du rayonnement solaire et de la durée du jour. Les quantités d'eau et d'éléments nutritifs absorbés peuvent varier selon la saison. Il est donc nécessaire de vérifier régulièrement et d'équilibrer les fluctuations afin d'optimiser l'alimentation minérale. Dans un système ouvert, non recyclé, le volume de drainage doit représenter 20 % de l'apport. Dans un système fermé avec recyclage, il peut être plus élevé.

Tableau 5. Valeurs indicatives (plage optimale) pour l'analyse de feuille de concombre, poivron et tomate (macro-éléments en % de la matière sèche, oligo-éléments en mg/kg de matière sèche) (Göhler et Molitor 2002).

Valeurs indicatives	Culture		
	Concombre	Poivron	Tomate
N (%)	3,5–5,5	3,5–4,2	3,2–5,0
P (%)	0,4–0,8	0,4–0,8	0,35–0,7
K (%)	3,0–5,0	5,0–6,0	3,5–5,5
Mg (%)	0,4–0,8	0,4–0,8	0,35–0,7
Ca (%)	2,0–5,5	2,8–3,2	2,0–5,0
Fe (mg/kg)	85–250	110	85–300
Mn (mg/kg)	50–300	55	50–250
B (mg/kg)	45–100	55–100	40–100
Zn (mg/kg)	30–150	–	30–125
Cu (mg/kg)	5–18	–	5–16
Mo (mg/kg)	0,3–2,0	–	0,3–3,0



### 3. Bibliographie

- Brajeul E., Javoy M., Pelletier B. & Letard M., 2001. Le concombre. Monographie. Ctifl, Paris. 349 p.
- Göhler F. & Molitor H.-D., 2002. Erdelose Kulturverfahren im Gartenbau. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart (Hohenheim). 267 p.
- Le Quillec S., Brajeul E., Sédilot C., Raynal Lacroix C., Letard M. & Grasselly D., 2002. Gestion des effluents des cultures légumières sur substrat. Ctifl, Paris. 199 p.
- Pivot D., Reist A. & Gillioz J., 1999. Tomates en serre: substrats réutilisés, solutions recyclées. Revue suisse de Viticulture, Arboriculture, Horticulture 31 (5), 265–269.
- Pivot D. & Gillioz J., 2004. Poivron: adaptation de la solution nutritive en système recyclé. Revue suisse de Viticulture, Arboriculture, Horticulture 36 (6), 368–372.
- Pivot D., Gilli C. & Carlen C., 2005. Données de base pour la fumure des cultures de légumes, de fleurs et de fraises sur substrat. Revue Suisse de Viticulture, Arboriculture, Horticulture 34 (4), 3–8.
- Sonneveld C., 1989. A method for calculating the composition of nutrient solutions for soilless cultures. Serie: Voedingsoplossingen glastuinbouw n°10, 3<sup>rd</sup> ed. 13 p.
- Sonneveld C. & Straver N. B., 1994. Nutrient solution for vegetables and flowers grown in water or substrates. Voedingsoplossingen glastuinbouw 8, 1–33.
- Sonneveld C. & Voogt W., 2009. Plant Nutrition of Greenhouse Crops. Springer Science + Business Media B.V. Springer Netherlands. 431 S.
- Urban L. & Urban I., 2010. La production sous serre. Tome 2: L'irrigation fertilisante en culture hors sol, 2<sup>e</sup> édition. Edition Tec&Doc, Paris. 233 p.

## 4. Liste des tableaux

Tableau 1. Masse molaire (MM) des éléments chimiques utilisés pour la préparation des solutions nutritives. ....	11/4
Tableau 2. Compositions en éléments minéraux des solutions nutritives de diverses cultures maraîchères sur substrats organiques en système ouvert (SO) et fermé (SF). ....	11/4
Tableau 3. Préparation de la solution nutritive pour une culture de tomate sur substrat dans un système ouvert en considérant les teneurs en éléments fertilisants dans l'eau. ....	11/5
Tableau 4. Adaptation de la solution nutritive pendant les 4 à 8 premières semaines de culture. Différences par rapport aux concentrations recommandées pour ces cultures dans le tableau 2. ....	11/5
Tableau 5. Valeurs indicatives (plage optimale) pour l'analyse de feuille de concombre, poivron et tomate. ....	11/6

## 5. Liste des figures

Figure 1. Poivrons sur substrat. ....	11/3
Figure 2. Les tomates sont les principaux légumes cultivés sur substrat en Suisse. ....	11/3
Figure 3. Concombres sur substrat. ....	11/3
Figure 4. Ordinateur pour mélanger et gérer la fertigation pour les cultures maraîchères sous serre. ....	11/5
Figure 5. Mesure du pH et de l'électroconductivité (EC) de la solution nutritive. ....	11/6



## 12/ Fertilisation en viticulture

Jean-Laurent Spring et Thibaut Verdenal  
Agroscope, 1009 Pully, Suisse

Renseignements : [jean-laurent.spring@agroscope.admin.ch](mailto:jean-laurent.spring@agroscope.admin.ch)

## Table des matières

1. Introduction.....	12/3
2. Particularités de la viticulture.....	12/3
2.1 Choix du porte-greffe.....	12/3
2.2 Observation du végétal .....	12/3
2.3 Analyse du végétal.....	12/3
2.4 Profil cultural .....	12/5
3. Besoins en éléments nutritifs .....	12/6
3.1 Déséquilibres nutritionnels et troubles physiologiques.....	12/6
4. Pratique de la fertilisation.....	12/11
4.1 Fertilisation azotée.....	12/11
4.2 Fertilisation P, K, Mg et B.....	12/12
4.3 Apport de matière organique .....	12/13
4.4 Fertilisation des jeunes vignes.....	12/13
4.5 Fertilisation foliaire .....	12/13
5. Bibliographie .....	12/15
6. Liste des tableaux.....	12/16
7. Liste des figures.....	12/16

## 1. Introduction

En viticulture, l'objectif d'une fertilisation raisonnée consiste à fournir à la plante une nutrition minérale équilibrée, garante d'une croissance harmonieuse et d'une production de qualité, tout en respectant l'environnement. La fertilisation n'intervient pas seule dans la nutrition de la vigne : les propriétés du sol, les conditions climatiques ainsi que les pratiques culturales interagissent fortement avec les mécanismes de l'alimentation. Avant toute réflexion sur les apports de fertilisants, il faut optimiser les conditions de base (drainage, teneur en matière organique, état structural, etc.) et les techniques culturales (entretien du sol, rapport feuille/fruit, etc.), en accord avec les potentialités du site. Ces conditions de départ étant réunies, la fertilisation doit permettre de maintenir le pool alimentaire du sol dans un état de fertilité satisfaisant, sans l'appauvrir ni l'enrichir inutilement.

L'équilibre nutritionnel de la plante est intimement lié au climat : par l'influence directe de celui-ci sur les biosynthèses végétales, d'une part, et par son action indirecte sur la dynamique du sol où sont absorbés les éléments fertilisants, d'autre part. Révélé par l'analyse du végétal, cet équilibre est donc le reflet de l'absorption des éléments minéraux par la plante dans un milieu climat/sol donné. En réalité, il n'existe que peu de corrélations entre cet équilibre et les teneurs en minéraux du sol, puisque leur disponibilité et leur absorption dépendent essentiellement du climat, notamment en relation avec le régime hydrique. Une bonne connaissance du sol et de son comportement sous diverses conditions climatiques devient dès lors indispensable à la compréhension de la nutrition végétale. C'est par quatre voies différentes, mais souvent complémentaires, que la fertilité du sol, au sens large, peut être approchée :

- l'observation du végétal, qui permet de se rendre compte de visu d'éventuels déséquilibres de nutrition ou de troubles physiologiques ;
- l'analyse du végétal, qui montre comment une plante s'est alimentée au cours de la saison et qui révèle les problèmes non décelables à l'oeil ;
- le profil cultural, qui permet d'apprécier la colonisation du sol par les racines, la succession d'horizons de différente nature, l'état structural et la circulation de l'eau et de l'air ;
- l'analyse de terre, qui aide à estimer la richesse en éléments fertilisants du sol.

## 2. Particularités de la viticulture

Pour les éléments minéraux principaux tels que le phosphore, le potassium et le magnésium, les normes de fertilisation proposées sont fondées sur les prélèvements de la vigne exportés hors de la parcelle ou immobilisés dans les parties pérennes (les sarments étant restitués). Les normes sont adaptées en fonction du rendement en raisin. Le rééquilibrage de l'état de fertilité de sols trop riches ou trop pauvres est entrepris par le biais d'un suivi

régulier de la richesse en éléments fertilisants et par une correction correspondante de la norme de fertilisation. Ces mesures permettent d'éviter carences et déséquilibres nutritionnels (antagonismes) préjudiciables à la culture et à l'environnement.

Pour l'azote (N), élément clé de la croissance végétative, les décisions sont essentiellement basées sur le comportement végétatif de la vigne. Elles sont intégrées dans un concept qui tient compte de l'ensemble des mesures influençant la disponibilité de cet élément. Dans un premier temps, on pose un diagnostic sur le niveau d'alimentation azotée de la vigne par l'observation du végétal, complétée ou non par des analyses du végétal. Dans une deuxième phase et en cas de déséquilibre, on suit un schéma de décision qui tient compte non seulement de la fertilisation azotée, mais également d'autres aspects susceptibles de jouer un rôle important, par exemple l'entretien du sol.

### 2.1 Choix du porte-greffe

Lors d'une reconstitution se pose la question du choix d'un porte-greffe adapté. Le porte-greffe influence le niveau de vigueur conféré, la résistance à la sécheresse ou aux excès d'eau temporaires, mais également la capacité spécifique d'absorption des éléments minéraux. L'absorption du fer (Fe) et la sensibilité à la chlorose ferrique est très fortement influencée par le porte-greffe ainsi que par de nombreux aspects liés au type de sol, au climat et à certains paramètres culturaux (tableau 6). La teneur en calcaire et plus particulièrement en calcaire actif du sol joue un rôle particulièrement important. Le calcaire actif représente la proportion de calcaire sous forme de particules fines, de la taille de l'argile ou du silt. Il est dit actif parce qu'il offre, pour un poids identique, une surface d'attaque aux acides du sol nettement supérieure à celle des grosses particules. Certaines échelles internationales concernant le choix du porte-greffe sont basées sur le calcaire actif. La détermination du calcaire actif dans le sous-sol avant une reconstitution n'est utile que si la teneur en calcaire total excède 10 %. Le tableau 1 réunit les seuils limites de calcaire total et de calcaire actif pour les principaux porte-greffes utilisés en Suisse.

### 2.2 Observation du végétal

L'expression végétative, le développement des grappes et la couleur du feuillage sont souvent révélateurs du bon ou du mauvais fonctionnement des organes souterrains. Pour les déséquilibres nutritionnels, la reconnaissance des symptômes est importante, ainsi que le moment de leur apparition et leur répartition spatiale dans la parcelle ou dans la région (chapitre 2.4). Il faut aussi se remémorer les conditions météorologiques qui ont précédé l'apparition du dysfonctionnement ; elles en sont fréquemment à l'origine.

### 2.3 Analyse du végétal

Différentes méthodes analytiques permettent de préciser ou de confirmer les observations faites sur la vigne.

**Tableau 1. Résistance à la chlorose ferrique en fonction des taux de calcaire total et actif**

Porte-greffe		Calcaire total (%)	Calcaire actif (%)
<i>V. riparia</i>	Riparia gloire de Montpellier	0–15	0–6
<i>V. riparia</i> x <i>V. rupestris</i>	3309 (Couderc)	0–22	0–11
	101-14 (Millardet et de Grasset)	0–20	0–9
<i>V. riparia</i> x <i>V. berlandieri</i>	5 BB (Kober)	0–40	0–20
	5 C (Téleki)	0–40	0–20
	SO4 (Sél. Oppenheim)	0–35	0–18
	125 AA (Kober)	0–35	0–13
	420 A (Millardet et de Grasset)	0–40	0–20
	161-49 (Couderc)	0–50	0–25
<i>V. berlandieri</i> x <i>V. rupestris</i>	1103 (Paulsen)	0–30	0–17
<i>V. vinifera</i> x <i>V. berlandieri</i>	41B (Millardet et de Grasset)	> 50	0–40
( <i>V. berlandieri</i> x <i>V. vinifera</i> ) x ( <i>V.berlandieri</i> x <i>V. longii</i> )	Fercal	> 60	> 40
161–49 C x 3309 C	Gravesac	0–15	0–6

### 2.3.1 Analyse foliaire

L'analyse foliaire sert à contrôler l'état d'approvisionnement de la vigne durant la saison. Elle complète les autres moyens d'investigation et ne permet pas, à elle seule, d'établir un plan de fertilisation. Sont déterminées couramment les teneurs en N, P, K, Ca et Mg. D'autres éléments, en particulier les oligo-éléments tels que le bore (B), le manganèse (Mn), le fer (Fe) et le zinc (Zn), peuvent aussi être analysés. Le prélèvement pour l'analyse foliaire se pratique normalement au début de la véraison. Il reste néanmoins possible en dehors de cette période; mais l'interprétation des résultats est plus aléatoire. On prélève environ 25 feuilles adultes (avec pétiole) régulièrement réparties sur les rameaux prin-

cipaux au niveau des grappes. On veillera à ne pas prélever de feuilles déchiquetées ou nécrosées et à acheminer rapidement l'échantillon au laboratoire. L'analyse foliaire permet de mettre en évidence des carences latentes et des antagonismes entre éléments, et complète ainsi les observations faites dans le profil cultural et les résultats d'analyse de sol. Pour interpréter les résultats, on utilise des valeurs de référence en provenance de la littérature ou de matériel végétal identique considéré comme sain. Depuis 1976, Agroscope a créé une base de données pour le Chasselas, le Gamay, le Pinot noir et le Merlot. Les plages d'interprétation sont données dans le tableau 2. Pour d'autres cépages, il convient de prendre contact avec le laboratoire Sol-Conseil à Gland.

**Tableau 2. Plages de référence pour le diagnostic foliaire en viticulture au stade de début véraison. Les valeurs sont exprimées en % de la matière sèche.**

(Valeurs provenant du réseau de référence de la Suisse romande et du Tessin de 1976 à 2000). L'interprétation normale s'effectue sur cinq classes, les classes faibles et élevées se calculent par différences.

Cépage		Chasselas	Pinot noir	Gamay	Merlot
N	très faible	< 1,74	< 1,93	< 1,74	< 1,85
	bon	1,93–2,31	2,08–2,38	1,93–2,31	1,98–2,24
	très élevé	> 2,50	> 2,53	> 2,50	> 2,37
P	très faible	< 0,15	< 0,18	< 0,18	< 0,13
	bon	0,17–0,20	0,20–0,23	0,21–0,27	0,14–0,18
	très élevé	> 0,22	> 0,25	> 0,30	> 0,19
K	très faible	< 1,38	< 1,45	< 1,05	< 1,95
	bon	1,56–1,92	1,59–1,87	1,24–1,62	2,10–2,40
	très élevé	> 2,10	> 2,01	> 1,82	> 2,55
Ca	très faible	< 2,07	< 2,24	< 3,07	< 1,47
	bon	1,49–3,33	2,66–3,51	3,42–4,14	1,64–2,00
	très élevé	> 3,75	> 3,94	> 4,49	> 2,17
Mg	très faible	< 0,15	< 0,16	< 0,15	< 0,18
	bon	0,19–0,27	0,20–0,29	0,21–0,34	0,20–0,24
	très élevé	> 0,31	> 0,33	> 0,40	> 0,27

### 2.3.2 Indice chlorophyllien

L'indice chlorophyllien du feuillage est mesuré en plein champ à l'aide d'un appareil portable (N-Tester, Yara International, Paris, France). Les valeurs obtenues reflètent l'intensité de la couleur verte du feuillage. Cette méthode permet de diagnostiquer de manière assez fiable l'état d'approvisionnement des plantes en N, pour autant que celles-ci ne souffrent pas d'autres carences avérées ou latentes, notamment en Fe (chlorose ferrique) ou en Mg, susceptibles d'influencer la couleur du feuillage. La détermination de l'indice chlorophyllien est également déconseillée sur des feuilles malades, présentant des décolorations d'origine parasitaire (viroses, cicadelles...) ou fortement souillées ou altérées par des produits de traitement ou d'autres causes (coup de soleil, sécheresse, etc.). Il est recommandé d'effectuer les mesures au stade début véraison sur les feuilles principales entières et non abîmées de la zone des grappes (au minimum 4 mesures de 30 feuilles chacune par zone considérée comme homogène). Pour le Chasselas, le Pinot noir et le Gamay, des seuils d'interprétation pour des mesures effectuées à cette époque sont proposés (Spring et Jelmini 2002) (tableau 3). Des mesures plus précoces dans la saison sont déconseillées.

**Tableau 3. Seuils pour l'interprétation de l'indice chlorophyllien du feuillage à la véraison mesuré à l'aide du N-Tester.** Feuilles principales de la zone des grappes (Spring et Jelmini 2002).

Appréciation du niveau d'alimentation azotée	Indice N-Tester		
	Chasselas	Pinot noir	Gamay
Très faible	< 420	< 460	< 380
Faible	420–460	460–500	380–430
Normal	460–540	500–580	430–530
Elevé	540–570	580–620	530–580
Très élevé	> 570	> 620	> 580

### 2.3.3 Azote assimilable

L'azote assimilable par les levures dans le moût à la vendange est essentiel pour le bon déroulement de la fermentation alcoolique. Il est également source de précurseurs aromatiques. Principalement composé d'acides aminés et d'ammonium, sa part dans le N total du raisin peut varier de 25 à 40 %. Les concentrations de N assimilable dans le moût varient fortement selon les conditions (sol, climat, rapport feuille-fruit, cépage, porte-greffe et, techniques culturales). Le N assimilable est généralement mesuré à partir d'un échantillon de moût prélevé juste après foulage et est exprimé en mg N/l. Il peut aussi être représenté par l'indice de formol (Aerny 1996). Les moûts carencés donnent généralement des vins moins expressifs en arômes, plus astringents et plus amers. Les seuils de sensibilité à la carence en N assimilable sont variables selon les cépages. Pour les cépages blancs (ou les cépages rouges vinifiés en rosé), il est généralement admis, à l'exemple du Chasselas, qu'une concentration d'au minimum 140 mg N/l d'azote assimilable par litre (indice de formol 10), idéale-

ment 200 mg N/l (indice de formol 14), contribue efficacement à une vinification réussie (tableau 4). Pour les cépages rouges, les effets d'une carence azotée de la vendange sont moins marqués.

Sachant que la quantité de N assimilable varie généralement peu au cours de la maturation, sa détermination précoce à partir d'un échantillon représentatif de baies au début de la véraison peut donner une information utile pour justifier une correction éventuelle par apport d'urée foliaire (chapitre 4.1). Afin que les résultats soient représentatifs, il convient d'apporter une attention particulière au prélèvement des échantillons (minimum 200 baies prélevées sur l'ensemble de la zone considérée et maximum une baie par cep, en veillant à prélever sur les différentes parties de la grappe).

**Tableau 4. Seuils de sensibilité du Chasselas à la carence en N assimilable dans le moût**

	Forte carence	Carence modérée	Valeur optimale
Azote assimilable (mg N/l)	< 140	140–200	200
éq. Indice de formol	< 10	10–14	14

### 2.4 Profil cultural

Le profil cultural est un outil indispensable pour caractériser certaines propriétés du sol :

- succession des horizons et profondeur utile;
- volume occupé par la pierrosité;
- état et stabilité de la structure;
- porosité et compacité;
- activité biologique;
- enracinement de la vigne.

Ces propriétés conditionnent la dynamique de l'eau et des éléments nutritifs. Leur connaissance est nécessaire pour appréhender le fonctionnement du sol et ses relations avec la plante. La réserve utile en eau (RU) peut être estimée grâce à la texture, la pierrosité, la profondeur sol et l'enracinement de la vigne. Les observations faites dans un profil de sol rendent également service lorsqu'il s'agit de décider :

- de l'opportunité d'un drainage (présence d'excès d'eau temporaires);
- de l'opportunité de l'irrigation (RU inférieure à 100 mm);
- de la profondeur de travail du sol (décompactages, création de banquettes);
- du mode d'entretien du sol (volume de la RU);
- du choix du porte-greffe (présence de calcaire, potentiel de vigueur conférée par le sol);
- du choix du cépage (en fonction de la réserve hydrique et des exigences spécifiques du cépage);
- du mode d'application des engrais et des amendements.

Le profil cultural est particulièrement indiqué lors d'accidents de végétation sans raison apparente et lors de mouvements de terre importants. La localisation d'un profil cultural devrait être choisie de sorte à ce qu'il soit représentatif de la zone étudiée (parcelle ou zone homogène dans une parcelle). Idéalement, il est creusé à une distance comprise entre 20 et 60 cm du pied de vigne pour permettre une bonne description de l'enracinement. Les analyses physico-chimiques de terre pour raisonner la fertilisation et le choix du porte-greffe doivent être réalisées sur un échantillon moyen de la parcelle.

### 3. Besoins en éléments nutritifs

Les besoins en éléments fertilisants de la vigne (normes) sont définis pour assurer une croissance optimale de la culture sur un sol considéré comme normalement pourvu. Le tableau 5 présente les prélèvements en éléments fertilisants au cours d'une année pour un rendement de 1,2 kg/m<sup>2</sup> de raisin, selon les données de Löhnertz (1988). Les feuilles et les sarments étant considérés comme recyclés dans la parcelle.

Pour P, K et Mg, la stratégie vise à assurer un état de fertilité suffisant du sol en restituant les prélèvements exportés et en évitant des déséquilibres susceptibles de perturber l'alimentation minérale de la vigne (consommation de luxe, antagonismes).

Le N est probablement l'élément le plus important dans le métabolisme de la vigne. Un excès aussi bien qu'une carence en N aura d'importantes conséquences physiologiques sur la vigueur, sur la maturation des raisins, sur la sensibilité aux maladies fongiques et entraîne souvent une dépréciation de la qualité des vins (Maigre *et al.* 1995). Les besoins en N de la vigne sont relativement modestes mais concentrés sur une période assez courte (figure 1). Du débourrement au stade 5-6 feuilles étalées, le N provient essentiellement des réserves (racines, vieux bois). Un premier pic principal d'absorption du N, le plus important, se situe juste après la floraison. Un second pic d'absorption se situe juste après la véraison. En fin de sai-

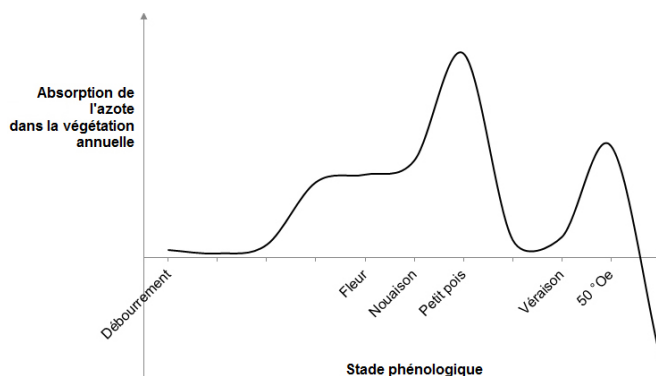


Figure 1. Intensité de l'absorption du N dans la végétation annuelle de la vigne (sarments, feuilles, raisins) (selon Löhnertz O. 1988).

son, une partie du N migre dans les organes de réserve avant la chute des feuilles. L'alimentation azotée de la vigne est grandement influencée par les conditions pédologiques et climatiques. L'effet millésime est d'ailleurs souvent très marqué sur la teneur en N assimilable dans le moût. Dès la plantation, le choix d'un cépage et d'un porte-greffe adaptés aux conditions pédoclimatiques régionales ainsi qu'un entretien raisonné du sol sont la base d'une bonne alimentation azotée.

#### 3.1 Déséquilibres nutritionnels et troubles physiologiques

Divers troubles de l'alimentation peuvent apparaître chez la vigne. Selon leur nature, ils sont caractérisés par des symptômes particuliers. Les problèmes peuvent être d'origines diverses (carences, excès, conditions pédoclimatiques, état physiologique de la plante, etc.). Des investigations complémentaires peuvent être nécessaires pour déterminer l'origine des troubles et les moyens de lutte à mettre en œuvre. Les principales carences et les troubles d'ordre physiologique de la vigne sont exposés dans le tableau 6. Les causes et les moyens de lutte appropriés y sont décrits. Les engrais foliaires doivent être réservés aux cas de carences avérées ou dans des situations à risques reconnues ou chroniques.

Tableau 5. Prélèvements d'éléments fertilisants par le Riesling selon Löhnertz (1988).

Valeurs d'exportation par les raisins corrigées pour un rendement de 1,2 kg/m<sup>2</sup>.

Répartition	Éléments en kg/ha/an			
	N	P	K	Mg
Vieux bois	27	5	17	3
Raisins	23	4	42	2
Total exporté et immobilisé	50	9	59	5
Sarments	5	1	10	1
Feuilles	37	3	17	4
Prélèvements totaux	92	13	86	10



Tableau 6. Principaux déséquilibres et troubles physiologiques de la vigne.



Carence en N	Excès de N
	
<b>Symptômes</b>	<b>Symptômes</b>
<p><b>Feuilles :</b> vert pâle puis jaunes, nervures comprises</p> <p><b>Pétiotes :</b> peuvent devenir rouges</p> <p><b>Rameaux :</b> vigueur réduite</p> <p><b>Grappes :</b> coulure</p> <p><b>Etendue du phénomène :</b> généralisé à la parcelle avec des zones plus prononcées</p> <p><b>Epoque d'apparition :</b> en général peu avant fleur</p>	<p><b>Feuilles :</b> de grande taille, vert foncé</p> <p><b>Rameaux :</b> vigueur forte, aoûtement retardé</p> <p><b>Grappes :</b> compactes, sensibles au botrytis, dans les cas extrêmes coulure par excès de vigueur, dessèchement de la rafle</p> <p><b>Etendue du phénomène :</b> généralisé à la parcelle avec des zones plus prononcées</p>
<b>Causes possibles</b>	<b>Causes possibles</b>
<p><b>Fertilisation :</b> insuffisante, taux de MO faible</p> <p><b>Climat :</b> excès d'eau, froid, sécheresse</p> <p><b>Entretien du sol :</b> concurrence de l'enherbement, tassement, amendement organique avec C/N &gt; 50</p>	<p><b>Fertilisation :</b> excessive</p> <p><b>Climat :</b> favorable à la minéralisation de la matière organique (MO)</p> <p><b>Sol :</b> excès de MO, travail du sol, chaulage sur sols acides riches en MO</p>
<b>Investigations complémentaires</b>	<b>Investigations complémentaires</b>
<p><b>Analyse de terre :</b> granulométrie, MO, pH</p> <p><b>Diagnostic foliaire</b></p> <p><b>N assimilable dans le moût</b></p> <p><b>Indice chlorophyllien du feuillage (N-Tester)</b></p> <p><b>Profil :</b> état structural, état de décomposition de la MO, régime hydrique</p>	<p><b>Analyse de terre :</b> granulométrie, MO, pH</p> <p><b>Diagnostic foliaire</b></p> <p><b>Indice chlorophyllien du feuillage (N-Tester)</b></p> <p><b>Profil :</b> profondeur du sol, régime hydrique</p>
<b>Moyens de lutte envisageables</b>	<b>Moyens de lutte envisageables</b>
<p><b>Court terme :</b></p> <p><b>Fertilisation foliaire :</b> urée, nitrate de potasse ou préparation spécifique du commerce</p> <p><b>Fertilisation au sol :</b> nitrate de chaux</p> <p><b>Long terme :</b></p> <p><b>Entretien au sol :</b> limiter la concurrence du gazon en vigne enherbée, localisation du N sur le rang désherbé. Plan de fumure minéral, fertilisation organique, aération du sol, drainage, irrigation</p>	<p><b>Long terme :</b></p> <p>Stopper apports de N organique et minéral, enherber</p>

Tableau 6. Principaux déséquilibres et troubles physiologiques de la vigne (suite).



Carence en K	Carence en Mg
	
<b>Symptômes</b>	<b>Symptômes</b>
<p><b>Feuilles:</b> coloration brillante au départ, enroulement en gouttière, puis décoloration et brunissement du pourtour, manifestation du phénomène sur les jeunes feuilles</p> <p><b>Plantes:</b> plus sensible à la sécheresse Ralentissement de l'accumulation des sucres dans la baies</p> <p><b>Etendue du phénomène:</b> souvent généralisé à la parcelle avec des zones plus prononcées</p> <p><b>Epoque d'apparition:</b> dès floraison</p>	<p><b>Feuilles:</b> coloration intervinaire des feuilles à la base des rameaux : - jaunissement (cépages blancs) - rougissement (cépages rouges)</p> <p><b>Etendue du phénomène:</b> généralisé à la parcelle, plus fréquent sur jeunes vignes</p> <p><b>Epoque d'apparition:</b> en général dès fin juillet-août; dans les cas graves, plus tôt</p>
<b>Causes possibles</b>	<b>Causes possibles</b>
<p><b>Fertilisation:</b> insuffisante</p> <p><b>Sols:</b> très argileux (rétrogradation), légers (lessivage), après gros mouvements de terre, création après prairies naturelles</p>	<p><b>Fertilisation:</b> insuffisante en Mg ou excès de K (antagonisme), fertilisation azotée sous forme ammoniacale</p> <p><b>Climat:</b> années humides</p> <p><b>Equilibre de la plante:</b> équilibre feuille/fruit, porte-greffe et cépages sensibles</p> <p><b>Enracinement:</b> sols et techniques culturales entraînant un enracinement superficiel (dans les horizons enrichis en potasse)</p>
<b>Investigations complémentaires</b>	<b>Investigations complémentaires</b>
<p><b>Analyse de terre:</b> CEC, granulométrie, K</p> <p><b>Diagnostic foliaire</b></p>	<p><b>Analyse de terre:</b> K, Mg</p> <p><b>Diagnostic foliaire</b></p> <p><b>Profil cultural:</b> enracinement</p>
<b>Moyens de lutte envisageables</b>	<b>Moyens de lutte envisageables</b>
<p><b>Court terme:</b></p> <p><b>Fertilisation foliaire:</b> sulfate de potasse ou préparation spécifique du commerce (plusieurs pulvérisations nécessaires)</p> <p><b>Fertilisation au sol:</b> sulfate de potasse ou autre engrais soluble (appliqués au pal injecteur)</p> <p><b>Long terme:</b></p> <p><b>Fertilisation au sol:</b> plan de fumure minéral</p>	<p><b>Court terme:</b></p> <p><b>Fertilisation foliaire:</b> sulfate de magnésium hydraté ou préparation spécifique du commerce (plusieurs pulvérisations nécessaires)</p> <p><b>Long terme:</b></p> <p><b>Fertilisation foliaire:</b> sulfate de magnésium hydraté ou préparation spécifique du commerce (plusieurs pulvérisations nécessaires)</p> <p><b>Fertilisation au sol:</b> raisonnée K et Mg</p> <p><b>Plante:</b> maîtrise du rendement, adaptation du porte-greffe</p>

Tableau 6. Principaux déséquilibres et troubles physiologiques de la vigne (suite).





Carence en B	Carence en Fe
	
<b>Symptômes</b>	<b>Symptômes</b>
<p><b>N.B. :</b> les symptômes d'excès sont identiques aux symptômes de carence</p> <p><b>Feuilles :</b> déformées, petites, boursouffées, marbrées, jaunissement en mosaïque</p> <p><b>Rameaux :</b> vigueur réduite, entre-nœuds courts, manifestation du phénomène sur les jeunes pousses, entre-cœurs dominants sur la pousse principale</p> <p><b>Grappes :</b> forte coulure, déformation</p> <p><b>Etendue du phénomène :</b> souvent généralisé à la parcelle avec des zones plus atteintes</p> <p><b>Epoque d'apparition :</b> souvent déjà avant fleur</p>	<p><b>Feuilles :</b> jaunissement, nervures non comprises, nécroses dans les cas graves</p> <p><b>Rameaux :</b> vigueur réduite, manifestation de la chlorose sur les jeunes feuilles ou l'extrémité des rameaux</p> <p><b>Grappes :</b> petites, jaunes, coulées</p> <p><b>Cep :</b> dépérissements dans les cas graves</p> <p><b>Etendue du phénomène :</b> souvent localisé</p>
<b>Causes possibles</b>	<b>Causes possibles</b>
<p><b>Fertilisation :</b> insuffisante, chaulage important</p> <p><b>Climat :</b> sécheresse</p> <p><b>Sol :</b> léger, filtrant (lessivage), calcaire (blocage). Sur création après prairies, carences en bore et en potassium souvent associées</p>	<p><b>Equilibre de la plante :</b> mauvais équilibre feuille/fruit l'année précédente, porte-greffe inadapté</p> <p><b>Climat :</b> excès d'eau, froid</p> <p><b>Sol :</b> calcaire, asphyxiant</p> <p><b>Entretien du sol :</b> tassement, travail du sol, amendements organiques insuffisamment décomposés et enfouis</p> <p><b>N.B. :</b> les carences en Fe ne sont partiellement jamais dues à une déficience en fer dans le sol</p>
<b>Investigations complémentaires</b>	<b>Investigations complémentaires</b>
<p><b>Analyse de terre :</b> B, calcaire total, pH</p> <p><b>Diagnostic foliaire</b></p>	<p><b>Analyse de terre :</b> granulométrie, MO, pH, calcaire total et actif</p> <p><b>Profil :</b> état structural, état de décomposition de la MO, régime hydrique</p> <p><b>Plante :</b> conduite et rendements antérieurs</p>
<b>Moyens de lutte envisageables</b>	<b>Moyens de lutte envisageables</b>
<p><b>Court terme :</b></p> <p><b>Fertilisation foliaire :</b> préparation spécifique du commerce</p> <p><b>Fertilisation au sol</b> (pour autant qu'une irrigation soit possible en période sèche)</p> <p><b>Long terme :</b></p> <p><b>Fertilisation au sol :</b> plan de fumure minéral et organique, attention en cas de chaulage</p>	<p><b>Court terme :</b></p> <p><b>Fertilisation foliaire :</b> préparation spécifique du commerce, efficacité aléatoire</p> <p><b>Fertilisation au sol :</b> chélates de fer (appliqués au pal injecteur, surtout dans les sols lourds)</p> <p><b>Long terme :</b></p> <p><b>Fertilisation au sol :</b> chélates de fer (appliqués au pal injecteur, surtout dans les sols lourds)</p> <p><b>Entretien du sol :</b> aération, enherbement, drainage</p> <p><b>Plante :</b> favoriser un rapport feuille/fruit équilibré, adaptation du porte-greffe</p>

Tableau 6. Principaux déséquilibres et troubles physiologiques de la vigne (suite).

Dessèchement de la rafle	Folletage des grappes
	
<b>Symptômes</b>	<b>Symptômes</b>
<p><b>Grappes :</b> dessèchement d'une partie ou de la totalité des rafles, maturation interrompue des parties de grappes touchées</p> <p><b>Epoque d'apparition :</b> peu après la véraison</p>	<p><b>Grappes :</b> maturation des baies interrompue, parfois flétrissement des baies, pointes de grappes plus sensibles, pas de dessèchement de rafle</p> <p><b>Epoque d'apparition :</b> peu après la véraison</p>
<b>Causes possibles</b>	<b>Causes possibles</b>
<p><b>Fertilisation :</b> excès de N, excès de K, manque de Mg</p> <p><b>Climat :</b> humide, brusques écarts climatiques</p> <p><b>Equilibre de la plante :</b> vigueur élevée, déséquilibre au niveau de l'assimilation des cations (K<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>)</p> <p><b>Cépage :</b> sensibilité variétale (ex. : Chasselas très sensible, Pinot noir moins sensible)</p> <p><b>Porte-greffe :</b> défavorisant l'absorption du Mg et favorisant la vigueur</p>	<p><b>Fertilisation :</b> excès de N et excès d'irrigation</p> <p><b>Climat :</b> humide, brusques écarts climatiques</p> <p><b>Equilibre de la plante :</b> vigueur élevée, grande disponibilité en eau, dysfonctionnement du système vasculaire (phloème-xylème)</p> <p><b>Cépage :</b> sensibilité variétale (Cabernets, Gamay, Chasselas, Humagne rouge sensibles)</p> <p><b>Sols :</b> grande réserve en eau, sols fertiles</p>
<b>Investigations complémentaires</b>	<b>Investigations complémentaires</b>
<p><b>Analyse de terre :</b> K, Mg</p> <p><b>Diagnostic foliaire</b></p>	<p><b>Profil culturel :</b> estimation de la réserve utile en eau</p>
<b>Moyens de lutte envisageables</b>	<b>Moyens de lutte envisageables</b>
<p><b>Court terme :</b></p> <p><b>Pulvérisation sur grappes :</b> sulfate de Mg hydraté dès le début de la véraison, deux fois à dix jours d'intervalle en mouillant bien les grappes ou préparation du commerce</p> <p><b>Long terme :</b></p> <p><b>Equilibre de la plante :</b> maîtrise de la vigueur, choix du porte-greffe</p> <p><b>Fertilisation :</b> raisonner la fertilisation azotée, potassique et magnésienne</p> <p><b>Entretien du sol :</b> enherbement</p>	<p><b>Court terme :</b></p> <p><b>Plante :</b> régulation de la charge en éliminant la pointe des grappes (cépages sensibles)</p> <p><b>Long terme :</b></p> <p><b>Plante :</b> maîtrise du rendement, adaptation du rapport feuille/fruit, choix du porte-greffe</p> <p><b>Fertilisation :</b> raisonner la fertilisation azotée</p> <p><b>Alimentation en eau :</b> raisonner l'irrigation</p>

## 4. Pratique de la fertilisation

### 4.1 Fertilisation azotée

Pour le N, aucune fertilisation de reconstitution n'est recommandée. Les jeunes vignes ne demandent aucune fertilisation azotée. Celle-ci doit en effet être adaptée au développement de la vigne.

Toute modification des pratiques de fertilisation azotée ou d'entretien du sol doit s'appuyer sur l'observation du comportement de la vigne (tableau 7), renforcée ou non par des données analytiques (diagnostic foliaire, N assimilable dans le moût).

Dans une situation équilibrée, il est possible de conserver les pratiques des années précédentes (fertilisation azotée, entretien du sol). En raison de la forte influence du climat annuel sur la nutrition azotée de la vigne, il est prudent de confirmer un diagnostic sur deux à trois ans d'observations.

En cas de déséquilibre (carence ou excès), le tableau 8 permet d'en rechercher les causes ainsi que les solutions techniques qui peuvent être envisagées. Les recommandations de fertilisation azotée annuelle sont comprises entre 0 et 50 kg/ha. Seuls des cas exceptionnels justifient une fertilisation azotée plus élevée. En cas de non-réponse ou de réaction insuffisante de la vigne à une variation de la fertilisation azotée dans le cadre de cette fourchette, il faudra principalement agir sur les aspects liés aux pratiques culturales ou, dans le cadre d'une reconstitution, au choix du matériel végétal.

En raison des risques de lixiviation (pertes par drainage), il est inutile d'apporter trop tôt la fertilisation azotée. A l'inverse, des apports trop tardifs sont à proscrire pour ne pas prolonger la végétation et favoriser certains parasites (botrytis) ou accidents physiologiques (dessèchement de la rafle). En conditions normales, une fertilisation azotée effectuée au moyen de nitrate d'ammoniaque devrait être appliquée au stade 3-5 feuilles étalées, peu avant le pre-

Tableau 7. Nutrition azotée, diagnostic de l'année en cours.

Critères		Diagnostic			
		Excès	Equilibre	Carence	
Critères de base observation de la plante	Vigueur :	Grosseur des bois et des feuilles Longueur des entre-nœuds	Elevée	Normale	Faible
	Coloration feuillage :	Couleur de la feuille (à la véraison) Indice chlorophyllien du feuillage (N-Tester) à la véraison	Vert foncé indice N-Tester élevé	Vert normal indice N-Tester normal	Vert clair indice N-Tester faible
	Sensibilités :	à la pourriture à la coulure (par excès de vigueur), au dessèchement de la rafle	Elevée	–	–
Informations complémentaires données analytiques	Teneur en N foliaire à la véraison (diagnostic foliaire)		Elevée	Normale	Faible
	Teneur en N assimilable dans le moût à la vendange (cépages blancs et rouges vinifiés en blanc/rosé)		–	Normale	Faible

Tableau 8. Propositions de solutions techniques pour gérer l'alimentation azotée.

Observations	Excès de N	Carence en N
Entretien du sol	Enherber ou augmenter la surface enherbée si les conditions le permettent (sol, climat, mode de conduite)	Diminuer la surface enherbée Choix d'un enherbement moins concurrentiel Favoriser l'enracinement (drainage, décompactage si nécessaire)
Matière organique (MO)	En cas de MO excessive : Stopper les apports de MO	En cas de MO insuffisante : Apport de MO
Alimentation hydrique	En cas d'alimentation en eau excessive : Réduire l'irrigation Enherber ou augmenter la surface enherbée si les conditions le permettent (sol, climat, mode de conduite)	En cas de contrainte hydrique marquée : Raisonnement l'irrigation et l'entretien du sol
Choix du porte-greffe	Choix d'un porte-greffe moins vigoureux lors d'une reconstitution	Choix d'un porte-greffe plus vigoureux lors d'une reconstitution
Gestion de la haie foliaire	Respecter un rapport feuille/fruit équilibré	En cas de carence en N assimilable dans le moût : Réduire la hauteur de haie foliaire si elle est excessive
Fertilisation azotée (N)	Diminuer ou supprimer la fertilisation N	Augmenter la fertilisation N Localiser la fertilisation N sur le cavillon desherbé Apport d'urée foliaire à la véraison (corrige essentiellement la teneur en N des moûts)

mier grand pic d'absorption à la floraison. Cette période d'application indicative peut être modulée en fonction de certains facteurs: on retardera légèrement les apports en années ou en zones tardives, sous climat humide, sur sols très filtrants et lors d'apports sous forme nitrique exclusive (par ex. nitrate de chaux). On avancera légèrement les apports en années ou en zones précoces, sous un climat sec, sur des sols peu filtrants et lors d'apports sous forme exclusivement ammoniacale (par ex. sulfate d'ammoniaque) ou amidique (par ex. urée). Au besoin, un fractionnement de l'apport peut améliorer son efficacité par réduction des pertes. Dans les vignes enherbées, l'efficacité des apports localisés sur les parties désherbées (cavaillon, etc.) a été démontrée (Spring 2003). Il est souvent possible de diminuer ainsi les doses avec la même efficacité qu'un épandage effectué sur toute la surface. Les apports de N organique peuvent avoir lieu en automne déjà.

Lorsqu'une situation de carence azotée est identifiée sur la vigne en cours d'été (selon les critères décrits précédemment) ou fortement prévisible (déficit hydrique estival marqué, parcelle sensible au stress hydro-azoté), une possibilité de correction tardive est offerte par l'application d'urée foliaire autour de la véraison (Spring et Lorenzini, 2006; Spring *et al.* 2015). Ces apports sont généralement bien valorisés par la plante et entraînent essentiellement une augmentation du N assimilable dans les moûts. Cette technique est particulièrement indiquée pour des cépages blancs ou pour des cépages rouges vinifiés en rosé en permettant de diminuer les risques de perte qualitative liés à un stress hydro-azoté excessif (dénaturation aromatique, amertume et astringence des vins). Cette méthode ne saurait remplacer une gestion optimale des techniques culturales (entretien du sol, fertilisation N au sol) adaptées aux conditions pédoclimatiques de la parcelle. Elle constitue par contre une possibilité de correction efficace des teneurs en azote assimilable des moûts qu'il est possible de mettre en œuvre tardivement et à laquelle on ne doit recourir qu'en cas de nécessité (carence azotée avérée ou fortement prévisible).

Ces corrections se limitent généralement à des apports de 10–20 kg N/ha au total, apportés par applications de 5 kg N/ha, espacées de 7–10 jours entre elles, durant la période encadrant la véraison (en général durant le mois d'août). Afin d'améliorer l'absorption de l'urée et de réduire les risques de phytotoxicité (liés à la présence de biuret), les applications doivent être effectuées de préférence en début ou en fin de journée (températures plus basses et hygrométrie de l'air plus élevée) en mouillant bien l'ensemble du feuillage (volumes de bouillies au minimum de 200–400 l/ha, dans l'idéal de 600–800 l/ha).

La correction de la teneur en N assimilable des moûts obtenue peut varier selon le cépage, les conditions pédoclimatiques et l'année. Les observations pluriannuelles effectuées sur différents cépages blancs cultivés sur le domaine expérimental d'Agroscope à Changins montrent un gain moyen de l'ordre de 15 mg N/l de N assimilable (équivalent à environ 1 point d'indice de formol) pour chaque application de 5 kg N/ha effectuée sous forme d'urée autour de la véraison.

## 4.2 Fertilisation en P, K, Mg et B

### 4.2.1 Fertilisation de fond P, K, Mg, B, lors de la mise en place de la culture

La plupart des sols viticoles étant bien pourvus en éléments minéraux, la fertilisation de fond constitue une mesure exceptionnelle. Les normes sont recommandées lorsque l'état de fertilité est qualifié de pauvre et médiocre pour le potassium et de pauvre pour le phosphore par les méthodes d'analyses classiques (AAE10 et H<sub>2</sub>O10). Dans ces cas, les fertilisations de redressement peuvent être considérables. Aussi, l'incorporation des engrais dans toute la tranche de sol travaillée est-elle préconisée. Cette pratique est moins nuisible à l'environnement que de fortes fertilisations de rattrapage appliquées en surface après plantation. La démarche diffère selon l'élément considéré.

Les sols pauvres en **phosphore** sont rares en viticulture, mais dans certains cas, un apport de fond de 90 à 130 kg/ha de P (200 à 300 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) se justifie. La dose inférieure concerne les sols légers (< 10 % argile) et la dose supérieure, les sols lourds (> 30 % argile).

Pour le **potassium**, l'expérience montre qu'il est judicieux d'adapter la dose à la structure et à la capacité d'adsorption du sol (tableau 9). Comme indiqué précédemment, il est impératif de répartir les engrais sur toute la tranche de sol concernée par la préparation du terrain (40 à 60 cm). Pour une incorporation plus superficielle, on corrigera les doses en fonction de la profondeur de travail effective. Pour éviter des accidents à la végétation, notamment lors d'apports importants, il faudra utiliser du sulfate de potassium.

Le **magnésium** étant facilement lessivable, son apport en fertilisation de fond n'est pas indiqué. Les corrections nécessaires sont effectuées dans le cadre des fertilisations d'entretien annuelles.

Un apport de **bore** est nécessaire en cas de carence révélée par la culture précédente ou par une analyse de terre. Au besoin, 2 à 3 kg de bore par ha bien répartis sur l'ensemble de la surface sont largement suffisants.

Tableau 9. Quantité de fertilisation de fond kg K/ha (K<sub>2</sub>O/ha) en fonction de la nature et de l'état de fertilité du sol

Correction considérée pour une profondeur de travail de 50 cm.

Appréciation du sol	pauvre	médiocre	satisfaisant	riche
sol léger	500 (600)	350 (420)	0	0
sol moyen	750 (900)	500 (600)	0	0
sol lourd	1000 (1200)	700 (840)	0	0

#### 4.2.2 Fertilisation annuelle d'entretien P, K, Mg

Les présentes recommandations sont fondées sur l'étude de Löhnertz (1988), en considérant que les sarments sont restitués. Ils tiennent compte des niveaux de rendements pratiqués selon les directives de classification des vins (AOC, vins de Pays, vins de table), des raisins de table et des particularités régionales (tableau 10).

**Tableau 10. Normes de fertilisation annuelle pour la vigne en fonction du rendement (kg/ha/an) dans le cas d'un état de fertilité du sol satisfaisant**

Rendement (kg/m <sup>2</sup> )	P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	K (K <sub>2</sub> O)	Mg
0,8	10 (23)	45 (54)	25
1,0	10 (23)	55 (66)	25
1,2	12 (27)	65 (78)	25
1,6	12 (27)	75 (90)	25
2,0	15 (34)	85 (102)	25

La norme de fertilisation annuelle d'entretien correspond à la quantité de chaque élément qu'il faut apporter dans un sol dont l'état de fertilité est satisfaisant. Elle peut être corrigée entre -100 et +50 % suivant l'état de fertilité du sol (méthodes d'analyses classiques AAE10 et H<sub>2</sub>O10). L'objectif est de tendre vers un niveau de fertilité satisfaisant à long terme.

Il est possible d'apporter le **phosphore** en une seule fois pour quatre à six ans, seulement lorsque les quantités nécessaires sont faibles ou lorsque les apports sont effectués sous forme organique. Pour des apports relativement importants, sous forme minérale, il est préférable d'enfourir légèrement le produit en raison des risques de pertes par ruissellement.

Lorsque le sol est riche ou très riche en **potassium**, on supprimera les apports de K, mais on ne réduira pas les apports de Mg au-dessous de la norme afin de prévenir une carence en Mg par antagonisme K/Mg, même lorsque le sol est riche en Mg.

Pour le **magnésium**, en raison de sa grande mobilité dans le sol, la norme proposée est plus élevée que les exportations. Dans le cas d'un sol très riche en K (antagonisme avec Mg) et en présence de symptômes de carence magnésienne, des apports foliaires de Mg peuvent être recommandés, en complément des apports effectués au sol, afin d'éviter temporairement la carence. Mais la solution à long terme passe avant tout par le rééquilibrage de l'état de fertilité potassique du sol.

Le **bore** joue un rôle important dans le développement de la vigne et en particulier dans la nouaison. Un manque ou un excès de cet élément perturbent gravement le développement de la plante. L'utilisation d'engrais boriqués ou d'engrais complets contenant du B permet de lutter efficacement contre la carence. Dans le cas de sols pauvres en B, une fertilisation de correction de 2 kg/ha de bore est né-

cessaire les deux premières années, puis de 1 kg/ha les trois années suivantes. Ensuite, une nouvelle analyse doit être réalisée. Dans le cas de sols satisfaisants en B, une fertilisation d'entretien de 1 kg/ha/an peut être réalisée. Dans le cas de sols riches, l'abandon de la fertilisation boriquée jusqu'à la prochaine analyse est nécessaire, sauf si le sol concerné est léger, calcaire ou irrigué. Dans ces cas, la fertilisation boriquée doit être stoppée durant 2 ans, puis des apports d'entretien de 1 kg/ha/an seront réalisés; contrôler l'état de fertilité après 5 ans. Afin d'éviter les problèmes de toxicité, il est indispensable de veiller à une répartition homogène du B apporté et de ne jamais dépasser les doses prescrites. La culture de plantes exigeantes en B (crucifères), avec exportation de la biomasse produite, peut aider à résoudre les cas de toxicité.

#### 4.3 Apport de matière organique

L'apport de matière organique peu décomposée juste avant le travail du sol peut provoquer l'asphyxie des racines par dégagement de gaz (CO<sub>2</sub>, méthane), particulièrement lorsque la MO se retrouve en milieu privé d'air. Si une élévation du taux de MO est nécessaire, on apportera du fumier ou du compost, un ou deux ans avant le travail du sol ou dès la 2<sup>e</sup> feuille. Lorsque des apports importants sont justifiés, la quantité d'éléments minéraux contenus dans la MO peut dépasser les normes.

#### 4.4 Fertilisation des jeunes vignes

Pour autant que les résultats d'analyses de sol démontrent un niveau de fertilité satisfaisant ou que les fertilisations de fond avant plantation nécessaires aient été appliquées, aucune fertilisation n'est recommandée au cours des deux premières années pour P, K et Mg. La fertilisation annuelle d'entretien s'applique dès la troisième année.

#### 4.5 Fertilisation foliaire

Une alimentation équilibrée de la vigne doit être obtenue en priorité par une gestion judicieuse de l'état de fertilité des sols (analyse et plan de fumure adapté) ainsi que par le choix de matériel végétal (porte-greffe) et de modalités d'entretien du sol adaptés aux conditions pédoclimatiques du site. Dans certaines situations toutefois des compléments d'apport en fertilisation foliaire peuvent être indiqués, en cas de carences avérées (tableau 6) ou induites (antagonismes) susceptibles de perturber la croissance, la mise à fruits ou encore les aspects qualitatifs. L'absorption par la plante d'éléments minéraux apportés par voie foliaire est généralement bonne mais dépend de plusieurs facteurs:

- Surface foliaire suffisamment développée: en général pas avant la mi à la fin mai jusqu'à fin août (l'époque dépend du type de carence considéré) en évitant les apports durant la période de la floraison (risques de perturbation de la fécondation). L'absorption diminue en général pour des feuilles âgées.
- Conditions d'applications favorisant une bonne absorption: apports effectués de préférence en début ou en fin

de journée (hygrométrie de l'air plus élevée) en mouillant bien l'ensemble du feuillage (volumes de bouillies minimaux de 200–400 l/ha, sur végétation totalement développée dans l'idéal 600 à 800 l/ha de bouillie). Les températures trop élevées (ressuyage trop rapide) ou trop basses doivent être évitées (optimum autour de 20°C).

- pH de la bouillie de traitement adapté (optimum autour de 6,5). En général les applications foliaires sont effectuées seules, des mélanges avec d'autres produits ne sont envisageables que sur indication expresse du fabricant.
- Concentrations maximales à respecter selon les indications du fabricant (risques de phytotoxicité, apports en excès notamment de certains micro-éléments, susceptibles de provoquer des symptômes proches de ceux occasionnés par les carences).

Les indications pour le recours à des applications foliaires sont spécifiques aux problématiques concernant les différents éléments concernés.

### Azote

L'intérêt des apports foliaires de N concerne essentiellement l'ajustement de la concentration des teneurs en N assimilable dans les moûts par des apports d'urée tardifs (autour de la véraison) en situation de carence prévisible. Cette possibilité est décrite de manière détaillée au chapitre 4.1.

### Potassium

Les cas de carence en K sont principalement liés à de nouvelles créations de vigne sur sols pauvres en K ou à des impasses de fertilisation potassique pratiquées sans suivi depuis plusieurs années (notamment sur sols sableux à faibles capacités de rétention). La solution passe prioritairement par des fertilisations de correction au sol parfois élevées et difficiles à mettre rapidement à disposition des racines sur culture en place en raison de la faible mobilité de cet élément dans le sol (chapitre 4.2.1 et tableau 6). Parallèlement aux corrections effectuées au sol et en fonction de la gravité des symptômes de carence, des apports foliaires peuvent parfois être temporairement indiqués. On utilise généralement du sulfate de potassium en applications répétées (jusqu'à 5–6 applications par an lors de cas graves). L'utilisation du nitrate de potassium est également envisageable mais n'est souvent pas indiquée du fait de l'apport concomitant de N. Ces applications ne présentent qu'un effet partiel et limité dans la saison.

### Magnésium

Dans les conditions du vignoble suisse, la carence en Mg n'est que rarement liée primordialement à un état de fertilité insuffisant en cet élément dans les sols, mais la plupart du temps à des sols trop riches en K (antagonisme) (tableau 6). Un déséquilibre de l'alimentation en Mg joue d'autre part un rôle central dans les risques de dessèchement de la rafle. L'alimentation en Mg est particulièrement problématique sur jeunes vignes (racines situées dans l'horizon superficiel enrichi en potassium), en conditions de sol ou

de climat humide ou encore lors du choix de porte-greffe défavorisant l'alimentation magnésienne (SO4, 125 AA, 5BB, 5C, 8B). Le rééquilibrage à moyen et long terme de l'état de fertilité des sols en K doit être privilégié. Toutefois, dans des sols à forte capacité d'échange, ce rééquilibrage peut prendre de nombreuses années pendant lesquelles le risque de carence magnésienne induite reste important. Dans les vignes où de forts symptômes de carence magnésienne sont régulièrement observés, des applications foliaires répétées peuvent être justifiées. En général, on utilisera du sulfate de magnésium hydraté (3–4 fois en cours de saison). Pour des volumes de bouillies de 600–800 l/ha, la concentration usuelle est de 2%. En mélange avec d'autres matières actives, il convient de ne pas dépasser la concentration de 1% afin d'éviter des interactions négatives. Diverses préparations commerciales (sels, chélates) sont également envisageables; il convient alors de se référer aux prescriptions d'utilisation du fabricant.

L'application ciblée sur les raisins vise à réduire les risques de dessèchement de la rafle. Cette application est réservée aux parcelles sujettes à la carence magnésienne, aux situations et sur les cépages où cet accident physiologique se manifeste régulièrement. L'application de sulfate de magnésium hydraté (9,8%) utilisé à 18–20 kg/ha, vise à bien mouiller la rafle et s'effectue dans la zone des grappes avec un volume de bouillie de 600–800 l/ha, une première fois au début de la véraison puis 10 jours plus tard.

### Bore

La carence en B (tableau 6) se manifeste principalement dans des sols légers, pauvres en matière organiques, irrigués et à pH élevé. En fonction de la mobilité de cet élément les corrections effectuées au sol (chapitre 4.2.2) sont rapidement disponibles pour la plante (irrigation nécessaire en période de sécheresse). Les corrections foliaires ne sont de ce fait indiquées que dans certains cas sévères. Elles sont généralement effectuées au moyen d'acide borique (à la concentration de 0,2% soit 200 g/100 l de bouillie) ou de perborate de soude (à la concentration de 0,2% soit 200 g/100 l de bouillie), dans ces cas deux à trois pulvérisations peuvent être effectuées avant floraison. Un surdosage doit absolument être évité, un excès de bore causant les mêmes symptômes que sa carence.

### Fer

La carence en Fe est liée à une mauvaise absorption du Fe par les jeunes racines formées au printemps. En Suisse, la carence en Fe n'est pratiquement jamais liée à un manque de Fe dans les sols. L'expression et la gravité des symptômes est liée à des facteurs aussi divers que la nature du sol (sols très calcaires, pH élevé), le climat (printemps humides et froids, sols engorgés d'eau) ou encore le niveau insuffisant des réserves carbonées de la vigne (rapport feuille/fruit de l'année précédente, climat de l'année précédente) ainsi que le choix du porte-greffe qui influence fortement l'absorption du fer (tableau 6). La lutte contre la chlorose ferrique doit s'attacher prioritairement à régler ce problème en jouant sur ces facteurs: choix du porte-greffe, drainage, entretien du sol, limitation de la récolte. Les corrections par apports au sol ou en application fo-



liaire de sels ou de chélate de Fe ont un effet très aléatoire et souvent passager.

### Zinc

Cette carence s'observe extrêmement rarement sur la vigne (tableau 6). En Suisse, cette carence peut survenir essentiellement dans des sols acides, pauvres en Zn, suite à des chaulages ou à des fertilisations phosphatées importantes. Elle peut être traitée par trois applications foliaires à huit jours d'intervalles de sulfate de Zn, d'un chélate ou d'un fongicide contenant du Zn (par ex. mancozèbe). Ces fongicides font partie de la famille des dithiocarbamates et sont l'objet de restrictions d'utilisation en production intégrée (toxicité pour les typhlodromes).

### Manganèse

Cette carence s'observe assez rarement en Suisse. Elle peut apparaître ponctuellement sur des sols calcaires ou fortement chaulés et dans des sols riches en matières organiques. Il y a quelques années, cette carence était encore plus anecdotique qu'aujourd'hui en fonction de l'utilisation fréquente de fongicides de la famille des dithiocarbamates (comme le mancozèbe) qui contiennent du Mn et dont l'utilisation a été drastiquement réduite en production intégrée. La correction par apport de Mn au sol est peu efficace. Les applications foliaires de sulfate de manganèse (2-4 traitements encadrant la floraison) sont efficaces mais doivent souvent être répétées pendant quelques années.

## 5. Bibliographie

- Aerny J., 1996. Composés azotés des moûts et des vins. *Revue suisse Vitic., Arboric., Hortic.* 28 (3), 161-165.
- Collaud G., Ryser J.-P. & Schwarz J.-J., 1990. Capacité d'échange des cations. *Fiches de Sol-Conseil. Revue suisse Agric.* 22 (5), 285-289.
- Lönhertz O., 1988. Untersuchungen zum zeitlichen Verlauf der Nährstoffaufnahme bei *Vitis vinifera* (cv. Riesling). *Dissertation, Universität Giessen*, 228 p.
- Maigre D., Aerny J. & Murisier F., 1995. Entretien des sols viticoles et qualité des vins de Chasselas: influence de l'enherbement permanent et de la fumure azotée. *Revue suisse Vitic., Arboric., Hortic.* 27 (4), 237-251.
- Spring J.-L. & Jelmini G., 2002. Nutrition azotée de la vigne: intérêt de la détermination de l'indice chlorophyllien pour les cépages Chasselas, Pinot noir et Gamay. *Revue suisse Vitic., Arboric., Hortic.* 34 (1), 27-29.
- Spring J.-L., 2003. Localisation de la fumure azotée sur l'intercep en vignes enherbées. Résultats d'un essai sur Chasselas dans le bassin lémanique. *Revue suisse Vitic., Arboric., Hortic.* 35 (2), 113-119.
- Spring J.-L. & Lorenzini, F., 2006. Effet de la pulvérisation foliaire d'urée sur l'alimentation azotée et la qualité du Chasselas en vigne enherbée. *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic.* 38, 105-113.
- Spring J.-L., Verdenal T., Zufferey V. & Viret O., 2015. Fumure azotée en viticulture: influence de la période d'application. *Revue suisse Vitic. Arboric. Hortic.* 47 (3), 178-183.

## 6. Liste des tableaux

Tableau 1. Résistance à la chlorose ferrique en fonction des taux de calcaire total et actif.....	12/4
Tableau 2. Plages de référence pour le diagnostic foliaire en viticulture au stade de début véraison.....	12/4
Tableau 3. Seuils pour l'interprétation de l'indice chlorophyllien du feuillage à la véraison mesuré à l'aide du N-Tester. ....	12/5
Tableau 4. Seuils de sensibilité du Chasselas à la carence en azote assimilable dans le moût. ....	12/5
Tableau 5. Prélèvements d'éléments fertilisants par le Riesling selon Löhnertz (1988). ....	12/6
Tableau 6. Principaux déséquilibres et troubles physiologiques de la vigne. ....	12/7
Tableau 7. Nutrition azotée, diagnostic de l'année en cours.....	12/11
Tableau 8. Propositions de solutions techniques pour gérer l'alimentation azotée. ....	12/11
Tableau 9. Quantité de fertilisation de fond kg K/ha ( $K_2O$ /ha) en fonction de la nature et de l'état de fertilité du sol.....	12/12
Tableau 10. Normes de fertilisation annuelle pour la vigne en fonction du rendement (kg/ha/an) dans le cas d'un état de fertilité du sol satisfaisant.....	12/13

## 7. Liste des figures

Figure 1. Intensité de l'absorption du N dans la végétation annuelle de la vigne (sarments, feuilles, raisins).....	12/6
---	------



## 13/ Fertilisation en arboriculture

Thomas Kuster<sup>1</sup>, Othmar Eicher<sup>2</sup>, Lucie Leumann<sup>3</sup>, Urs Müller<sup>4</sup>,  
Jeanne Poulet<sup>5</sup> et Reto Rutishauser<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Agroscope, 8820 Wädenswil, Suisse

<sup>2</sup> Landwirtschaftliches Zentrum Liebegg, 5722 Gränichen, Suisse

<sup>3</sup> Ökohum, 8585 Herrenhof, Suisse

<sup>4</sup> BBZ Bildungs- und Beratungszentrum Arenenberg, 8268 Salenstein, Suisse

<sup>5</sup> Union fruitière lémanique, 1110 Morges, Suisse

Renseignements: [thomas.kuster@agroscope.admin.ch](mailto:thomas.kuster@agroscope.admin.ch)

## Table des matières

1. Introduction .....	13/3
2. Calcul des normes de fertilisation.....	13/3
2.1 Évaluation d'ensemble d'un site .....	13/3
2.2 Observations faites au champ .....	13/3
2.3 Analyses de sol .....	13/5
2.4 Exemple de calcul des besoins en engrais.....	13/7
2.5 Observations du feuillage.....	13/7
3. Éléments nutritifs et fertilisation en arboriculture .....	13/9
3.1 Dynamique des besoins en éléments nutritifs au cours de l'année .....	13/10
3.2 Azote .....	13/10
3.3 Phosphore.....	13/10
3.4 Potassium .....	13/11
3.5 Calcium.....	13/11
3.6 Magnésium .....	13/12
3.7 Soufre.....	13/12
3.8 Bore .....	13/12
3.9 Cuivre .....	13/13
3.10 Fer et manganèse.....	13/13
3.11 Zinc .....	13/14
4. Technique de fertilisation.....	13/14
4.1 Fertilisation distribuée ou localisée .....	13/14
4.2 Replantation et fertilisation des jeunes vergers.....	13/14
4.3 Engrais organiques.....	13/15
4.4 Fertigation et engrais liquides .....	13/15
4.5 Engrais foliaires .....	13/16
4.6 Engrais chélatés.....	13/17
4.7 Fertilisation des vergers haute tige .....	13/17
4.8 Fertilisation en arboriculture bio.....	13/17
5. Bibliographie .....	13/18
6. Liste des tableaux.....	13/19
7. Liste des figures.....	13/19

## 1. Introduction

Le module «Fertilisation en arboriculture» est destiné à promouvoir une fertilisation durable en arboriculture. C'est un document de référence pour toutes les exploitations qui produisent conformément aux prescriptions des prestations écologiques requises (PER). Les besoins en éléments nutritifs (normes) d'un verger sont basés principalement sur l'exportation d'éléments nutritifs par la récolte, sur les observations de l'état de la culture et les analyses de sol. A partir de cela sont déduites les normes de fertilisation qui permettent d'établir un plan de fumure durable. On assure ainsi un rendement élevé de fruits de qualité optimale, tout en évitant l'alternance et les troubles physiologiques. D'autre part, on réduit au minimum les impacts écologiques (p.ex. les pertes d'éléments nutritifs par lessivage). Ainsi, adapter sa stratégie de fertilisation en fonction des normes se justifie économiquement aussi bien qu'écologiquement. Les lignes directrices définitives pour une fertilisation durable en production intégrée (PI) ont été établies par le Groupe de travail pour la production fruitière intégrée en Suisse (GTPI) (Directives suisses pour les prestations écologiques requises (PER) en culture fruitière, GTPI 2017). Elles peuvent s'écarter de ce module 13.

On trouvera au chapitre 2 des indications pour le calcul des normes de fertilisation basé sur les observations faites dans les cultures et sur les analyses de sol. Ce chapitre est complété par des informations sur les symptômes foliaires de carences d'éléments nutritifs et sur les analyses de feuilles. Les chapitres 3 et 4 sont consacrés à la réflexion sur la fonction de chaque élément nutritif et de leur apport aux cultures fruitières, et la présentation de certaines techniques de fertilisation particulières (replantations et jeunes plantations, engrais organiques, fertigation et engrais liquides, engrais foliaires, éléments nutritifs chélatés, fertilisation des vergers haute tige et fertilisation en arboriculture bio). Les facteurs de correction basés sur les analyses de sol sont désormais communs avec les autres cultures et seront dorénavant traités dans le module 2. On trouvera des données sur les engrais dans le module 4. La fertilisation des arbustes à baies se trouve dorénavant dans le module 14. Autres modifications des contenus par rapport aux versions précédentes (Bertschinger *et al.* 2003): pour le magnésium (Mg), les normes de fertilisation ont été augmentées en rapport avec le rendement (tableau 1), afin de réduire le risque de carence en Mg lié à la concurrence pour l'assimilation (antagonisme) exercée par le potassium (K) et le calcium (Ca). Pour ce qui concerne les observations faites dans les cultures, les facteurs de correction «proportion de pierres» et «évaluation des désordres physiologiques» ont été supprimés (tableaux 3 et 5).

## 2. Calcul des normes de fertilisation

### 2.1 Évaluation d'ensemble d'un site

Le bilan des éléments nutritifs d'un verger est influencé principalement par les éléments exportés par la culture en place, mais aussi par les conditions météorologiques (précipitations, températures). C'est pourquoi, la disponibilité

en éléments nutritifs est très variable. Pour pouvoir cependant établir un bilan des éléments équilibré, on corrige la norme de fertilisation pour le phosphore (P), K et Mg (basée sur le rendement, chapitre 2.2.1) au moyen d'observations de la culture (chapitres 2.2.2 et 2.2.3) et d'analyses de sol (module 2). L'azote (N) peut être très mobile dans le sol selon la forme sous laquelle il se trouve; il est donc difficile d'interpréter sa disponibilité avec des analyses de sol. Pour le N, les corrections de la norme de fertilisation sont plutôt pratiquées d'après le rendement et les observations faites dans la culture.

Lorsqu'un site présente des caractéristiques (par exemple de pH ou de teneur élevée de Ca) qui ne peuvent pas être corrigées en quelques années par la fertilisation, par des changements simples du mode d'exploitation ou par des mesures d'assainissement, il convient d'essayer une nouvelle méthode d'exploitation du verger, compatible avec le site, ou un changement éventuel de culture.

## 2.2 Observations faites au champ

### 2.2.1 Exportation d'éléments nutritifs pendant la récolte

Pour maintenir l'équilibre du bilan des éléments nutritifs, il faut compenser les exportations dues à la récolte des fruits au moyen d'une fertilisation durable. La norme de fertilisation dépend donc du rendement: elle augmente avec celui-ci (tableau 1). Les bois de taille, les feuilles et les résidus de récolte restent en général sur place. Les teneurs en éléments nutritifs de ces organes ne sont donc pas comptés parmi les exportations (tableau 2). Les éléments nutritifs fixés ou lessivés dans le sol sont pris en compte par l'intermédiaire d'analyses de sol (chapitre 2.3.2).

### 2.2.2 Correction de la norme de fertilisation N d'après les observations faites sur la culture

N est l'élément nutritif qui exerce la plus grande influence sur la croissance de la plante et sur le rendement. Comme le N disponible par les plantes est très mobile dans le sol et qu'il est ainsi difficile d'en déterminer l'apport au cours de la période de végétation, on n'utilise pas d'analyses de sol pour calculer la fertilisation azotée en arboriculture. Pour corriger la norme de fertilisation (kg/ha), on met par contre à profit les observations faites dans la culture au cours de la période de végétation (pousse annuelle/état du feuillage, période d'arrêt de la pousse, importance de la floraison et précédent rendement) ainsi que la vigueur du porte-greffe par rapport à la profondeur du sol et sa teneur en matière organique (tableau 3). Pour les vergers de fruits à pépins et à noyau, les corrections possibles à la norme sont au maximum de -45 à +45 kg/ha. Pour le kiwi, la fertilisation azotée n'est corrigée qu'en fonction de la vigueur et de la teneur en matière organique (tableau 4).

### 2.2.3 Correction de la norme de fertilisation de P, K et Mg sur la base des observations faites dans le verger

Pour P, K et Mg, la norme de fertilisation dépendant du rendement (tableau 1) est corrigée sur la base des observa-

**Tableau 1. Normes de fertilisation (kg/ha) pour fruits à pépins et à noyau, ainsi que pour le kiwi, en rapport avec le rendement (kg/m<sup>2</sup>).**

Culture	Rendement (kg/m <sup>2</sup> )	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P	K <sub>2</sub> O	K	Mg
Pomme, poire	2,0	40	10	4,4	40	33,2	10
	3,0	50	15	6,5	60	49,8	20
	4,0	60	20	8,7	75	62,3	20
	5,0	70	25	10,9	90	74,7	30
	6,0	80	30	13,1	110	91,3	40
Cerise	0,8	40	15	6,5	40	33,2	10
	1,2	60	20	8,7	50	41,5	20
	1,6	80	30	13,1	65	54,0	30
	2,0	100	40	17,4	80	66,4	40
Prune	1,0	40	10	4,4	35	29,1	10
	1,5	60	15	6,5	50	41,5	15
	2,0	80	20	8,7	65	54,0	20
Abricot	1,5	45	20	8,7	60	49,8	10
	2,0	60	25	10,9	75	62,3	20
	2,5	75	30	13,1	90	74,7	30
Pêche	1,5	45	10	4,4	45	37,4	10
	2,0	60	15	6,5	55	45,7	20
	2,5	75	20	8,7	70	58,1	30
Kiwi	1,5	45	10	4,4	60	49,8	10
	2,0	50	15	6,5	75	62,3	15
	2,5	65	20	8,7	90	74,7	20

**Tableau 2. Besoins annuels d'éléments nutritifs (kg/ha) des différents organes des pommiers (Batjer et al. 1952)<sup>1</sup>.**

	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P	K <sub>2</sub> O	K	Ca	Mg
Fruits (40 t/ha)	20,0	13,0	5,7	60,0	49,8	3,6	1,8
Feuilles	43,0	6,5	2,8	54,5	45,2	70,1	16,3
Branches, tronc, racines	15,5	8,5	3,7	15,0	12,5	37,2	2,1
Divers (bourgeons, bois mort)	10,5	3,0	1,3	15,5	12,9	2,9	0,9
Bois de taille	10,0	4,4	1,9	4,0	3,3	22,9	1,5
Total verger	99,0	35,4	15,4	149,0	123,7	136,7	22,6

<sup>1</sup> Les valeurs des éléments nutritifs peuvent varier selon le site, la variété et le système de culture.

**Tableau 3. Correction de la fertilisation N pour fruits à noyau et à pépins (valeurs de correction en kg/ha).**

Pousse annuelle/état du feuillage	excessive/satisfaisant	-10	normal:	0	faible/médiocre:	+10
Arrêt de la pousse	tardif:	-5	normal:	0	précoce:	+5
Richesse de la floraison / de la fructification	faible:	-5	normal:	0	grande:	+5
Rendement de l'année précédente	faible:	-5	normal:	0	grand:	+5
Vigueur du porte-greffe	Profondeur du sol > 80 cm		Profondeur du sol 40–80 cm		Profondeur du sol < 40 cm	
grande		-10		-5		0
moyenne		-5		0		+5
faible		0		+5		+10
Taux de matière organique <sup>1</sup>	élevé:	-10	suffisant:	0	bas:	+10

<sup>1</sup> Pour le classement du taux de matière organique (élevé, satisfaisant, bas), voir tableau 3, module 2.

**Tableau 4. Correction de la fertilisation N pour les vergers de kiwi (valeurs de correction en kg/ha).**

Vigueur	excessive:	-30	normale:	0	faible:	+15
Taux de matière organique <sup>1</sup>	élevé:	-12	suffisant:	0	bas:	+9

<sup>1</sup> Pour le classement du taux de matière organique (élevé, satisfaisant, bas), voir tableau 3, module 2.

**Tableau 5. Correction de la fertilisation P, K et Mg pour les fruits à pépins (FP) et à noyau (FN) ainsi que pour le kiwi (valeurs de correction en pourcentage).**

	FP et FN	Kiwi						
Vigueur du porte-greffe:	X		profondeur du sol > 80 cm	profondeur du sol 40–80 cm	profondeur du sol < 40 cm			
moyenne à grande			-10 %	0 %	+10 %			
faible			0 %	0 %	+20 %			
Humus <sup>1</sup>	X	X	élevé	-10 %	suffisant	0 %	bas	+10 %

<sup>1</sup> Pour le classement du taux de matière organique (élevé, satisfaisant, bas), voir tableau 3, module 2.

**Tableau 6. Analyses de sol obligatoires et recommandées en arboriculture.**

Nécessité	Analyse	Fréquence
Minimum standard <sup>1</sup>	P, K, Mg (extraits H <sub>2</sub> O10 et AAE10)	tous les 5–10 ans <sup>2</sup>
	matière organique (évaluation échelle couleurs)	tous les 5–10 ans <sup>2</sup>
	pH (dans H <sub>2</sub> O)	tous les 5–10 ans <sup>2</sup>
	granulométrie/teneur d'argile (évaluation sensorielle)	une seule fois
Recommandé <sup>3</sup>	oligo-éléments (B, Fe, Mn, Zn)	tous les 5–10 ans <sup>2</sup>
	matière organique (analysée)	tous les 5–10 ans <sup>2</sup>
	granulométrie/teneur d'argile (analysées)	une seule fois
	capacité d'échange de cations	une seule fois
	saturation	une seule fois

<sup>1</sup> Pour les exploitations PER, les exigences applicables figurent dans l'Ordonnance sur les paiements directs (OFAG 2016), ou dans les lignes directrices SAIO (SAIO 2016).

<sup>2</sup> Plus fréquemment dans les exploitations commerciales présentant des difficultés dans les cultures ou des problèmes de qualité.

<sup>3</sup> Autres possibilités d'analyse pour l'évaluation du site, recommandées surtout pour les nouvelles plantations et en cas de difficultés dans les cultures.

tions faites dans la culture et des analyses de sol (module 2). Ainsi, les corrections (en pourcents) basées sur les observations faites dans le verger sont limitées pour P, K et Mg à la vigueur du porte-greffe par rapport à la profondeur du sol (sans le kiwi) et sur sa teneur en matière organique (tableau 5). Dans les sols riches en K, la fertilisation magnésienne devrait être d'au moins 20 kg/ha (chapitre 2.3.2).

### 2.3 Analyses de sol

Le prélèvement d'échantillons de sol et le calcul des facteurs de correction basé sur les analyses de sol sont exposés en détail dans le module 2. Les principes les plus importants sont résumés dans les paragraphes suivants, où sont également abordés les aspects spécifiques à l'arboriculture.

#### 2.3.1 Prélèvement d'échantillons

La disponibilité des éléments nutritifs (P, K, Mg), le pH et la teneur en matière organique sont déterminés dans l'horizon superficiel (2–25 cm), en règle générale tous les cinq ans mais au moins tous les dix ans (tableau 6). Par contre, on ne détermine qu'une seule fois les propriétés du sol (granulométrie, capacité d'échange de cations) sur lesquelles le mode d'exploitation n'a pas d'influence. Comme les racines des arbres fruitiers colonisent surtout l'horizon superficiel, on peut en règle générale renoncer à l'analyse d'échantillons de sol de l'horizon inférieur (sous-sol, 25–50 cm). Mais dans le cas de nouvelles plantations, de symptômes de carences, de problèmes cultureux ou de mesures

d'amélioration du sol, il faut procéder à des analyses de sol des deux horizons superficiel et inférieur, à courts intervalles de temps, afin de détecter assez tôt d'éventuelles évolutions défavorables.

L'échantillon de sol est composé de 12–20 prélèvements réalisés en diagonale dans la parcelle (figures 1 et 2; Agroscope 1996). Chaque prélèvement doit être représentatif de la parcelle ou de la zone choisie (une analyse couvre 3 ha au maximum). Si la fertilisation se fait par fertigation (chapitre 4.4), ou au pal injecteur (chapitre 4.7), la repré-

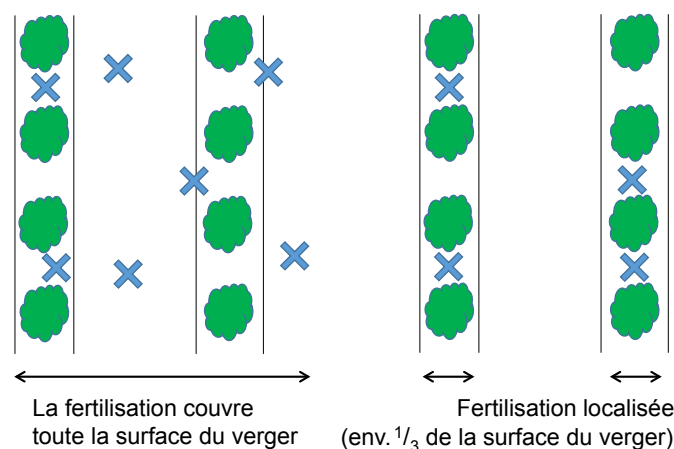


Figure 1. Schéma de prélèvement d'échantillons de sol (x), dans le cas où l'engrais est distribué sur toute la parcelle (à gauche) ou lorsque l'engrais est apporté localement sur des terrasses ou sur les lignes (à droite).



Figure 2. Avec une tarière, on prélève 12–20 échantillons représentatifs par parcelle à des profondeurs de 2–25 cm et 25–50 cm (photo: Andreas Naef, Agroscope).

sentativité n'est pas assurée avec 12 prélèvements. Dans ces cas, il est recommandé de doubler au moins le nombre de prélèvements pour composer l'échantillon en mélange. Si la distribution d'engrais est limitée à la ligne (chapitre 4.1), ou si les lignes sont disposées sur des terrasses perpendiculaires à la pente, les prélèvements ne doivent se faire que dans les lignes (figure 1). L'époque idéale pour le prélèvement d'échantillons de terre en arboriculture se situe entre août et novembre.

### 2.3.2 Correction de la norme de fertilisation P, K et Mg sur la base d'analyses de sol

Les concentrations en éléments nutritifs P, K et Mg dans le sol sont déterminées au moyen de deux types d'extraction: l'extraction à l'eau (H<sub>2</sub>O10) permet de révéler les éléments nutritifs assimilables (tableaux 13–15, module 2), alors que l'extraction à l'ammonium-EDTA (AAE10) révèle aussi les éléments nutritifs plus fortement fixés (tableaux 16–18, module 2). Des facteurs de correction liés à la teneur d'argile et au taux de matière organique sont fixés pour établir les concentrations en éléments nutritifs déterminées par les deux procédés d'extraction. Il en résulte un classement des teneurs en éléments nutritifs en différents niveaux d'approvisionnement du sol, allant de A (pauvre) à E (très riche). Le calcul du facteur global de correction basé sur les analyses de sol est établi en comptant deux fois les résultats de l'extrait AAE10, et une fois ceux de l'extrait H<sub>2</sub>O10.

Le facteur global de correction est ensuite additionné à la correction sur la base des observations faites dans la culture (chapitre 2.2.3). La somme est multipliée par la norme de fertilisation (tableau 1) pour calculer les besoins

de fertilisation P, K et Mg (chapitre 4.5, module 2). Un exemple de calcul des apports d'engrais est présenté dans le tableau 7. Si les facteurs de correction respectifs de l'extrait AAE10 et H<sub>2</sub>O10 diffèrent de plus de deux niveaux d'approvisionnement (A à E), il est indispensable de faire appel à un expert pour interpréter les résultats car l'un des deux extraits est vraisemblablement défectueux. Pour P et Mg, l'extraction AAE10 n'est adéquate que pour les sols non calcaires dont le pH est inférieur à 6,8 ou AAE10-Ca < 4000 mg/kg (Stünzi 2006). Pour des valeurs pH comprises entre 6,8 et 7,8, on n'utilise que l'extrait H<sub>2</sub>O10 pour le calcul du facteur de correction pour P et Mg. Pour les sols dont le pH est supérieur à 7,8, il n'y a pas de schéma d'interprétation pour P, étant donné qu'en raison de la solubilité réduite du P, en particulier en cas d'excès important de Ca, la disponibilité effective du P peut être meilleure que ce qui est indiqué par le résultat de la mesure dans l'extrait H<sub>2</sub>O10. L'interprétation de ces résultats d'analyse exige de faire appel à des experts. Les résultats des analyses de sol doivent être éventuellement vérifiés par des analyses foliaires.

Dans les sols présentant un rapport défavorable des taux K:Mg (K en classe D et E et Mg en classes A à C), il y a en arboriculture un danger d'antagonisme entre K et Mg (chapitre 3.6). L'apport annuel de Mg doit être d'au moins 20 kg/ha dans un tel cas. Dans les sols alcalins (pH excédant 7,5 environ), il y a également une concurrence pour l'assimilation de Mg et de Ca: l'absorption de Mg par les racines est tellement réduite par la concentration de Ca dans le sol qu'un apport supplémentaire de Mg dans le sol n'y apporte pas de remède. Dans ce cas, il convient d'apporter la fertilisation Mg sous forme de chélate (engrais chélatés à charge neutre) en fertilisation foliaire.

### 2.3.3 Teneur en matière organique

D'une part, on utilise la teneur en matière organique du sol pour le calcul des facteurs de correction (tableaux 3–5). D'autre part, la teneur en matière organique d'un sol doit être régulièrement vérifiée en raison de l'influence qu'elle exerce sur ses propriétés physiques et biologiques. La teneur en matière organique doit être dans la catégorie «suffisante», en fonction de la teneur d'argile du sol (tableau 3, module 2). Les sols dont la teneur en matière organique est supérieure à 5 % sont rares en arboriculture. Si la teneur en matière organique est insuffisante, il faut envisager de l'influencer par des pratiques culturales afin de maintenir une activité saine dans le sol (chapitre 4.3). En règle générale, les changements de taux de matière organique d'un sol sont très lents.

### 2.3.4 Valeur pH

L'activité biologique du sol et l'assimilation de la plupart des éléments nutritifs dépendent du pH (Scheffer et al. 2010). C'est pourquoi il faut éviter toute modification

**Facteur global de correction**

=

(2 x facteur extrait AAE10 + 1 x facteur extrait H<sub>2</sub>O10) : 3



abrupte du pH, en particulier par un chaulage excessif. Le pH idéal en arboriculture se situe entre 6,0 et 7,5. Il est possible de l'augmenter par un chaulage (chapitre 2.3.5). Il est par contre difficile de le diminuer, par exemple en utilisant des engrais acidifiants, en raison du fort pouvoir tampon du carbonate de calcium.

### 2.3.5 Apports en Ca et chaulage

Un éventuel chaulage du sol se décide sur la base du tableau 22 du module 2, en fonction du pH et de la teneur en argile. En arboriculture, on considère comme idéal un pH situé entre 6,0 et 7,5. Un chaulage entre donc en ligne de compte surtout pour des sols dont le pH est inférieur à 5,9. Si le pH se situe entre 5,9 et 6,5 et que la teneur en Ca est insuffisante, il est préférable d'utiliser des engrais contenant du Ca. Comme une concentration trop élevée de Ca dans le sol concurrence l'assimilation d'autres minéraux (antagonisme), il faut déterminer pour chaque site le besoin d'un apport en Ca sous forme d'oxyde de calcium (CaO), ou d'une fertilisation calcique. Il faut éviter dans tous les cas un apport excessif de chaux.

Les chaulages exigent de grandes quantités de chaux qu'il faut calculer en fonction de la saturation et de la capacité d'échange de cations (tableau 24, module 2). Le calcul d'un chaulage doit être fait par un expert.

## 2.4 Exemple de calcul des besoins en engrais

L'exemple fictif d'un verger de pommiers donnant 4 kg/m<sup>2</sup> de fruits (tableau 7) pourra aider à calculer la norme corrigée de fertilisation sur la base des observations du sol et de la culture.

## 2.5 Observations du feuillage

Les analyses foliaires et les carences observées sur le feuillage permettent de suivre, au cours de la période de végétation, l'état de nutrition d'un verger (par exemple des carences latentes après des épisodes d'humidité, de sécheresse ou des carences résultant d'antagonismes entre éléments nutritifs). Les analyses foliaires peuvent compléter les analyses de sol, mais ne peuvent pas être utilisées dans le calcul des normes de fertilisation.

### 2.5.1 Analyses foliaires

Il est conseillé de prélever pour chaque analyse cent feuilles, avec leurs pétioles, au milieu des pousses de l'année (figure 3). Chaque feuille devrait être représentative au niveau de sa taille, de sa couleur et de l'angle d'insertion (environ 30 degrés) de l'arbre et du verger. Il faut prélever deux feuilles au maximum par arbre et ne pas mélanger des feuilles provenant de variétés différentes. Les pré-

Tableau 7. Exemple de calcul des besoins en engrais (kg/ha) pour un verger de pommiers fictif en plein rendement.

		Tableau	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P	K <sub>2</sub> O	K	Mg
Sol	Facteur de correction extrait H <sub>2</sub> O10 <sup>1</sup>	13–15 <sup>3</sup>		1,4	1,4	0,6	0,6	1,4
	Facteur de correction extrait AAE10 <sup>2</sup>	16–18 <sup>3</sup>		1,0	1,0	0,4	0,4	1,4
	Facteur de correction global pour ce sol <sup>4</sup>			1,1	1,1	0,5	0,5	1,4
Observations du verger	Pousse annuelle / état du feuillage: normal	3	+ 0					
	Arrêt de la pousse: précoce	3	+ 5					
	Richesse de la floraison / de la fructification: faible	3	- 5					
	Rendement de l'année précédente: normal	3	+ 0					
	Porte-greffe / profondeur du sol: faible, profondeur < 40 cm	3 & 5	+ 10	+ 20 %	+ 20 %	+ 20 %	+ 20 %	+ 20 %
	Taux de matière organique (4,1 % pour teneur d'argile 22 %: élevé)	3 & 5	- 10	- 10 %	- 10 %	- 10 %	- 10 %	- 10 %
	Somme corrections observations du verger		+ 0	+ 10 %	+ 10 %	+ 10 %	+ 10 %	+ 10 %
Norme de fertilisation	Norme de fertilisation pour un rendement de 4 kg de pommes/m <sup>2</sup>	1	60,0	20,0	8,7	75,0	62,3	20,0
	Correction pour ce sol			110 %	110 %	50 %	50 %	140 %
	Corrections observations du verger		+ 0	+ 10 %	+ 10 %	+ 10 %	+ 10 %	+ 10 %
	Somme corrections sol et verger		+ 0	120 %	120 %	60 %	60 %	150 %
	<b>Norme de fertilisation corrigée<sup>5</sup></b>		<b>60,0</b>	<b>24,0</b>	<b>10,4</b>	<b>45,0</b>	<b>37,4</b>	<b>30,0</b>

<sup>1</sup> Éléments nutritifs dans l'extrait H<sub>2</sub>O10: 3 mg P/kg, 55 mg K/kg, 7 mg Mg/kg; teneur en argile: 22 %.

<sup>2</sup> Éléments nutritifs dans l'extrait AAE10: 46 mg P/kg, 330 mg K/kg, 40 mg Mg/kg; teneur en argile: 22 %.

<sup>3</sup> Dans le module 2.

<sup>4</sup> Mode de calcul: (2 x facteur extrait AAE10 + 1 x facteur extrait H<sub>2</sub>O10) : 3. Arrondir ensuite la valeur obtenue au chiffre après la virgule.

<sup>5</sup> Si l'engrais n'est apporté que sur la ligne d'arbres, il est recommandé de réduire d'un tiers l'apport de N par hectare, ce qui localement revient à doubler la norme. Tous les autres éléments peuvent être apportés sur la ligne dans la quantité prévue par la norme (ce qui revient donc, localement, à tripler la norme). Voir chapitre 4.1.

lèvements ne doivent pas se faire après de fortes précipitations, après une irrigation intensive par aspersion ou après des fertilisations foliaires. Les échantillons de feuilles seront entreposés dans des sacs de congélation perforés et envoyés au laboratoire d'analyse dès que possible (au plus tard trois jours après le prélèvement). Les échantillons ne doivent pas être congelés. Pour éviter les retards dans l'acheminement ou dans l'analyse des échantillons, il faut prévenir assez tôt le laboratoire de leur envoi.

La concentration des éléments nutritifs dans les feuilles à un instant donné dépend fortement du stade de développement (âge) de la feuille, des conditions météorologiques, de la croissance des pousses, de la charge de fruits, de l'âge de l'arbre, de l'entretien du sol, des traitements phytosanitaires et de la variété, ce qui complique l'interprétation des résultats (Baab 2004). Au printemps, c'est-à-

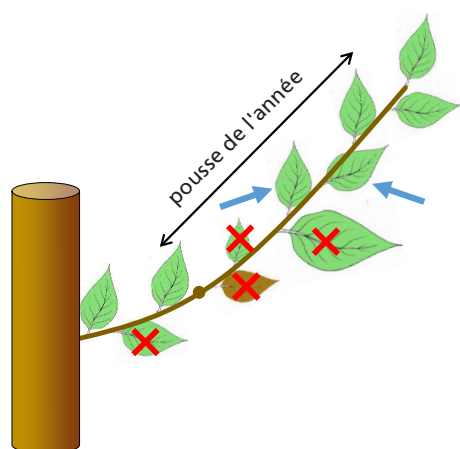


Figure 3. Pour l'analyse des feuilles, prélever au maximum deux feuilles par arbre, chacune au milieu d'une pousse de l'année (→). Les feuilles qui ne sont pas représentatives de l'arbre (ou du verger) quant à la forme, à la couleur ou à l'angle d'insertion, ne doivent pas être utilisées (X).

dire au débourrement, la plupart des éléments nutritifs mis en réserve au sein de l'arbre sont mobilisés. Au cours de la saison et du développement de la végétation, ces éléments en réserve sont progressivement remplacés par des éléments nutritifs prélevés dans le sol. C'est pourquoi les concentrations en éléments nutritifs dans les feuilles varient fortement au début de la période de végétation. Il est donc difficile, à cette période, d'évaluer de façon précise l'assimilation sur la base d'analyses foliaires (tableau 8). A partir de fin juillet-début août, les concentrations des feuilles en éléments nutritifs sont relativement constantes et peuvent donc renseigner de façon assez fiable sur l'état d'approvisionnement de la plante (tableau 9). Cependant, d'éventuelles carences révélées à ce moment-là ne pourront être corrigées que pour la saison suivante (apport d'engrais dans le sol, mise en réserve d'éléments nutritifs dans le tronc). C'est pourquoi, en dépit des incertitudes et des variations dans les concentrations d'éléments nutritifs, on observe une tendance aux analyses précoces dans la pratique.

Les valeurs de référence des analyses foliaires (tableaux 8 et 9) comprennent des valeurs indicatives pour un domaine moyen optimal. Comme ces valeurs optimales peuvent varier selon la variété, l'interprétation ne se fait pas selon un schéma rigide. De plus, la parcelle optimale a été définie différemment par les stations d'expérimentation et laboratoires en Suisse et à l'étranger, entre autres en raison des méthodes de détermination différentes et des modes de cultures différents. C'est pourquoi il convient de faire appel à des spécialistes (conseillers des offices cantonaux, laboratoires) pour l'interprétation des résultats. Dans tous les cas, il est recommandé de suivre l'évolution de la teneur des feuilles en éléments nutritifs sur plusieurs années, afin de pouvoir observer l'effet de la fertilisation et des mesures agronomiques réalisées et compenser les variations annuelles. Il est extrêmement important pour cela de toujours prélever les échantillons de feuilles au

**Tableau 8. Valeurs de référence des analyses foliaires d'une culture fruitière à mi-juin. Les valeurs sont données en pourcentages ou en mg/kg de la matière sèche.**

	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	B (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)
Pomme	2,60–3,20	0,20–0,40	1,10–1,50	0,80–2,00	0,23–0,50	30–100	8–25	50–150	50–150	30–100
Poire	2,70–3,50	0,20–0,50	1,50–2,50	0,90–2,00	0,25–0,50	30–100	8–25	50–150	50–200	25–100

Source: Pcfuit, St. Truiden (publié dans Baab 2004).

**Tableau 9. Valeurs de référence des analyses foliaires d'une culture fruitière en juillet/août (75–105 jours après la pleine floraison). Les valeurs sont données en pourcentages ou en mg/kg de la matière sèche.**

	N (%) <sup>1</sup>	P (%) <sup>1</sup>	K (%) <sup>1</sup>	Ca (%) <sup>1</sup>	Mg (%) <sup>1</sup>	B (mg/kg) <sup>2</sup>	Cu (mg/kg) <sup>2</sup>	Fe (mg/kg) <sup>2</sup>	Mn (mg/kg) <sup>2</sup>	Zn (mg/kg) <sup>2</sup>
Pomme	2,13–2,51	0,19–0,22	1,57–1,89	1,25–1,59	0,23–0,28	25–50	5–15	40–200	60–300	25–70
Poire	1,87–2,71	0,15–0,23	1,06–1,81	1,43–2,09	0,29–0,41	25–80	5–15	50–200	60–300	22–60
Prune	2,26–2,74	0,15–0,24	2,03–2,57	1,96–2,54	0,31–0,39	Données absentes				
Cerise	2,17–2,63	0,17–0,22	2,03–2,57	1,65–2,15	0,26–0,34	Données absentes				
Abricot	2,40–2,80	0,16–0,21	2,58–3,14	1,90–2,46	0,35–0,49	Données absentes				
Pêche	3,18–3,86	0,19–0,24	2,46–3,12	2,08–2,70	0,41–0,53	Données absentes				

Sources: <sup>1</sup> Bertschinger et al. (2003), <sup>2</sup> Pcfuit, St. Truiden (publié dans Baab 2004).

même moment ou au même stade de développement. On trouvera des valeurs de référence pour d'autres périodes (mai: analyse des feuilles des rosettes, septembre: données sur la mise en réserve) chez Baab (2004). On trouvera aussi des informations supplémentaires sur les analyses foliaires chez Bergmann (1993).

### 2.5.2 Symptômes de carences observées sur les feuilles

Lors d'une forte carence, on peut observer des décolorations foliaires. Ces symptômes peuvent ainsi indiquer, en première appréciation visuelle, quels éléments nutritifs ont été insuffisamment assimilés. L'interprétation des symptômes de carences foliaires nécessite cependant de l'expérience, d'où l'intérêt de faire appel à un expert pour les juger. Les symptômes des carences les plus courantes sont décrits au chapitre 3.

Lorsque l'on constate des symptômes évidents de carences, il n'est plus possible d'intervenir pour les corriger au cours de la même période de végétation. Par contre, on peut espérer les corriger pour l'année suivante avec des engrais apportés au sol ou grâce à une bonne mise en réserve des éléments nutritifs dans le bois.

## 3. Éléments nutritifs et fertilisation en arboriculture

Pour produire des fruits de haute qualité à un niveau de rendement élevé, l'arbre doit disposer de tous les éléments nutritifs au bon moment, en quantité suffisante et en équilibre les uns par rapport aux autres. Les manques, excès ou déséquilibres peuvent entraîner des symptômes de carences et des troubles physiologiques (perturbation de la maturation des fruits, alternance, croissance végétative au lieu de générative, baisse de la qualité des fruits).

La fertilisation n'est pas la seule possibilité pour rétablir l'équilibre physiologique des arbres en cas de problèmes d'assimilation: la taille, l'éclaircissage, les techniques d'irrigation ou l'entretien du sol peuvent également influencer positivement la croissance des arbres et ainsi l'assimilation des éléments nutritifs. De plus, la combinaison variété/porte-greffe peut ne pas être adaptée au sol ou au climat; il faut alors envisager à long terme de changer de culture.

Tableau 10. Échantillonnage, fertilisation du sol et fertilisation foliaire au cours de l'année pour les fruits à pépins (FP) et les fruits à noyau (FN).<sup>1</sup>

	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
	Repos végétatif	Débourrement	Floraison	Fructification/récolte fruits à noyau			récolte FP		Repos végétatif			
Échantillonnage												
Engrais au sol												
Engrais organique												
N			Plusieurs apports									
P												
K												
Ca/chaulage												
Mg		Chélate <sup>2</sup>										
B			Chélate <sup>2</sup>									
Fe			Chélate <sup>2</sup>									
Mn			Chélate <sup>2</sup>									
Engrais foliaires <sup>3</sup>												
N							FN		FP			
Ca												
Mg												
B												
Fe												
Mn												
Zn							FN		FP			

<sup>1</sup> Cellules gris sombre: moment idéal pour un apport. Cellules gris clair: autres moments possibles sur les sites problématiques et en cas de difficultés de gestion des cultures. Selon le site (climat, sol), les conditions météorologiques et le type de culture (espèce, variété), le calendrier d'apport doit être adapté. L'utilisation d'engrais foliaires et d'engrais contenant du Ca n'est pas toujours utile.

<sup>2</sup> Apporter au printemps la moitié de la quantité d'engrais annuelle, et répartir le reste en plusieurs apports sur 6–12 semaines. Les engrais chélatés peuvent être apportés sur la ligne au moyen de la barre de traitement. En cas de mélange avec des herbicides, il convient de vérifier les consignes d'utilisation.

<sup>3</sup> Seulement sur des sites où l'apport en éléments nutritifs et/ou la gestion de la culture posent des problèmes.

### 3.1 Dynamique des besoins en éléments nutritifs au cours de l'année

Les besoins en éléments nutritifs d'un verger dépendent de la saison. Pour réaliser des apports d'engrais en phase avec les besoins, il faut connaître les processus de croissance et les besoins en éléments nutritifs des arbres fruitiers. L'arbre a d'importants besoins nutritifs au printemps afin d'assurer la croissance des racines, des feuilles et des fleurs. En raison de l'absence ou du faible développement de la masse foliaire et de la disponibilité limitée en éléments nutritifs dans le sol encore froid, cette croissance se fait en consommant les réserves accumulées l'année précédente dans les branches, le tronc et les racines. La fertilisation du sol se fait donc en règle générale au printemps (tableau 10), au moment où la disponibilité des éléments nutritifs dans le sol est limitée, alors que les besoins des arbres sont élevés.

Le moment idéal d'un apport de N dépend de la teneur en argile d'un sol (mobilité du N dans le sol): l'apport de N se fait dès le début de mars dans les sols argileux et peu avant la floraison (fin mars/début avril, tableau 10) dans les sols pauvres en argile. Dans tous les cas, la fertilisation N doit se faire en deux ou trois apports avant (mars/avril) et après (mai/début juillet) la floraison, à raison d'un maximum de 40 kg N/ha par apport pour éviter le lessivage, en particulier des nitrates (module 7). Moins rapidement assimilables, les engrais organiques ont un effet plus durable, car les éléments nutritifs sont moins rapidement lessivés (voir chapitre 4.3). Un apport azoté trop tardif (à partir de juillet) retarde l'achèvement de la pousse et la maturation du bois, ce qui entraîne une diminution de la résistance au gel. C'est pourquoi le dernier apport de lisier doit être fait avant début juillet dans les vergers haute tige.

Dans le sol, P, K et Mg sont moins mobiles que N. C'est pourquoi ces éléments peuvent être apportés en une seule fois, au cours du repos végétatif (dès février/mars; pour les restrictions voir le module 7). Si les quantités nécessaires de P et de K sont faibles, il suffit d'un apport en quantité double tous les deux ans. Cependant, dans les cas de sols argileux ou calcaires, ainsi que dans les sols présentant des concentrations élevées d'oxydes de fer et d'aluminium, un apport trop hâtif de P entraîne sa fixation dans le sol où il n'est alors que brièvement assimilable par les plantes.

L'augmentation des températures au printemps entraîne la mobilisation croissante des éléments nutritifs (surtout du N) de la matière organique. Les réserves contenues dans le bois ainsi que la fertilisation du sol perdent ainsi progressivement de leur importance dès mai à juin. Sur les sites problématiques et si l'absorption d'éléments nutritifs par les racines ne suffit pas (chapitre 4.5), la formation des fruits peut être favorisée après la floraison par l'apport d'engrais foliaires. Cependant, la quantité d'éléments nutritifs absorbés par la feuille est en règle générale faible. À l'automne, les arbres retirent les éléments nutritifs des feuilles et accumulent des réserves dans leurs organes ligneux.

### 3.2 Azote

N est l'élément nutritif le plus important en arboriculture en tant que constituant des composés organiques (acides aminés, acides nucléiques et protéines) et de la chlorophylle. Une carence ou un excès de N perturbe l'équilibre physiologique des arbres et entraîne un rapport défavorable entre la croissance végétative et le développement végétatif, ou des défauts qualitatifs chez les fruits. Une carence en N (provenant surtout d'erreurs de fertilisation ou d'absence de mobilisation de N) réduit le rendement de la photosynthèse, augmente la sensibilité à la sécheresse, réduit la croissance végétative, provoque un aoûtement précoce des pousses et inhibe la formation des boutons floraux. Par la suite, les fruits insuffisamment pourvus restent petits et il y a un risque d'alternance. En cas de carence en N, la surface des feuilles devient d'abord vert-jaune à jaune (limbe pâle). Les pointes des feuilles prennent ensuite une teinte orange à rouge-violet. La coloration automnale est plus précoce.

Un excès de N entraîne une croissance plus vigoureuse de l'arbre et un aoûtement plus tardif des pousses. Il en résulte une maturation plus lente et une coloration moins intense des fruits, qui sont alors plus sensibles aux troubles physiologiques (taches liégeuses, pourriture du cœur, vitescence, brunissement de la chair). La qualité des fruits et leur aptitude à l'entreposage sont diminuées par l'excès de N. De plus, les arbres concernés sont plus sensibles aux dégâts de gel en raison de l'aoûtement tardif.

La fertilisation N est surtout apportée au cours des mois de mars à mai (tableau 10), c'est-à-dire quand le besoin en N est le plus grand et l'activité est encore faible dans le sol. Pour tenir compte de la grande mobilité de N dans le sol et du risque de lessivage, la quantité de N à fournir sera répartie en deux ou trois apports jusqu'au début de juillet. Informations supplémentaires: Baab (2009h).

### 3.3 Phosphore

P est un élément clé des processus de photosynthèse et de respiration, ainsi qu'un composant du porteur de l'information génétique (ADN). Il est ainsi impliqué dans tous les processus métaboliques végétatifs et génératifs. Il joue aussi un rôle important dans le maintien de la structure cellulaire, dans la construction des protéines et des hydrates de carbone ainsi que dans la division cellulaire et dans le transport des assimilats. C'est pourquoi la carence en P (figure 4) peut s'accompagner de désordres de croissance, de floraison et de mise à fruits. Elle se produit surtout dans les sols froids, secs, compactés, peu profonds et pauvres en matière organique où l'activité microbienne est faible, ou lorsque le pH est inférieur à 5,5 ou supérieur à 7,0. Les mesures d'amélioration de l'activité du sol et de sa structure pour favoriser un bon enracinement sont aussi importantes qu'un apport annuel de P. La rapidité de fixation de cet élément dans le sol implique que l'apport se fasse régulièrement au printemps plutôt qu'à l'automne (tableau 10). L'excès de P peut entraîner des symptômes de



Figure 4. Carence en P: feuillage pâle, feuilles petites, de teinte vert clair avec des nervures rougeâtres et des nécroses marginales en demi-lunes sur les feuilles âgées. Dès la deuxième moitié de la saison de végétation, les feuilles sont de teinte vert terne, bronze ou rouge-violet pour devenir coriaces et friables. Chez les fruits à noyau, les feuilles sont dressées, déformées en pointes de flèches et mouchetées de taches pourpres à cuivrées (photo: Tom Deckers, Pcfuit, St. Truiden).

carence d'autres éléments nutritifs, mais ce phénomène est rare. Informations supplémentaires: Baab (2009b).

### 3.4 Potassium

K joue un rôle dans la régulation du régime hydrique de la plante, dans l'activation des enzymes, dans la photosynthèse, dans la synthèse et le transport des produits du métabolisme et des substances de réserve. La carence en K (figure 5) réduit la croissance ainsi que la quantité et la qualité des fruits (petits fruits mal colorés et sans arôme). L'aptitude à l'entreposage peut être aussi réduite par une carence en K. Un approvisionnement optimal en K est important pour la résistance des plantes aux facteurs de stress tels la sécheresse, le gel ou les maladies. Les concentrations excessives de K dans le sol sont la cause de rapports K:Ca ou K:Mg défavorables, ce qui entraîne un risque de troubles physiologiques avec diminution de la qualité des fruits. Un excès de K peut aussi retarder la maturité des fruits.



Figure 5. La carence en K s'accompagne du développement de nécroses marginales sur les feuilles, d'abord à la pointe puis le long des bords. Cerises: feuilles bleu-vert s'enroulant parallèlement à la nervure centrale. Prunes: feuilles avec nécroses marginales brunes (photo: Tom Deckers, Pcfuit, St. Truiden).

En règle générale, la fertilisation K se fait au printemps avec des engrais potassiques contenant du sulfate (tableau 10). L'utilisation d'engrais organiques peut être recommandée sur les sites présentant des problèmes de disponibilité de K. On peut améliorer la qualité des fruits en appliquant des engrais potassiques par fertigation (apport par le système d'irrigation) de mi-juin à mi-août. La carence en K peut aussi être induite par un excès de N, mais c'est rare. Informations supplémentaires: Baab (2009a).

### 3.5 Calcium

Ca est d'une part un constituant qui joue un rôle important pour la stabilité des parois cellulaires, et d'autre part il est impliqué dans le processus de maturation des fruits. La carence en Ca (figure 6) s'accompagne de désordres entraînant des maladies physiologiques (taches liégeuses, brunissement de la chair, maturation précoce) qui réduisent l'aptitude des fruits à la conservation. La carence en Ca inhibe la croissance des racines, ce qui exerce une influence négative sur l'absorption d'eau et de nutriments. L'excès de Ca entraîne des carences d'autres éléments par antagonisme (concurrence d'absorption).

Si nécessaire, l'assimilation du Ca dans le sol peut être optimisée par une fertilisation en Ca, avec par exemple du sulfate de calcium. Dans les sols de pH inférieur à 5,9, on peut envisager un chaulage (chapitre 2.3.5), ce qui générale-



Figure 6. La carence en Ca entraîne dès le début de l'été des décolorations apicales des feuilles, puis des chloroses ou des marbrures chlorotiques et même des nécroses apicales (photos: en haut: Albert Widmer, Agroscope; en bas: Jeanne Poulet, Union fruitière lémanique).

ment influence aussi l'assimilation d'autres éléments nutritifs. Sur les sites présentant des problèmes d'approvisionnement en Ca, on peut apporter dès juin des engrais foliaires en complément (tableau 10, chapitre 4.5). L'impact de la gestion de la culture (charge fruitière régulière, croissance modérée des pousses et arrêt précoce de celle-ci, récolte au bon moment) est aussi important que celui de la fertilisation. Informations supplémentaires: Baab (2009f).

### 3.6 Magnésium

En tant que constituant important de la chlorophylle, Mg est important pour la photosynthèse. Mg active de nombreuses enzymes et participe ainsi à l'élaboration de glucides, de protéines, de graisses et de vitamines. Il joue également un rôle prédominant dans la stabilité des parois cellulaires et dans la régulation de l'hydratation. La carence en Mg (figure 7) entraîne la chute prématurée des feuilles, qui s'accompagne d'une diminution de la croissance du tronc, de la floraison et de la résistance au gel en raison du manque d'assimilats. Les fruits sont petits, fades, pauvres en sucres et peu colorés. À l'inverse, l'excès de Mg peut influencer négativement l'absorption d'autres éléments nutritifs tels par exemple K ou le manganèse (Mn).



Figure 7. Carence en Mg chez les pommiers: dès août/septembre, surtout chez les feuilles plus âgées, des taches ovales vert clair à jaunes, irrégulières entre les nervures encore vertes. Contrairement aux symptômes de la carence en Mn, les taches sont nettement délimitées d'avec les tissus encore verts. Les taches brunissent ensuite et se nécrosent. Les nervures ont souvent l'aspect d'arêtes de poisson. Chez les poiriers, des nécroses brun-noir ovales se développent en fin d'été le long de la nervure principale, entre les nervures encore vertes. Chez les pruniers et cerisiers, le limbe prend une teinte jaune-orange puis brunâtre à brune entre les nervures encore vertes (photos: Agroscope).

Mg est un élément problématique dans de nombreux vergers, surtout en raison de la concurrence pour l'absorption (antagonisme) avec d'autres éléments (en particulier K, mais aussi l'ammonium  $[NH_4^+]$ ). Lorsque le rapport K:Mg dans le sol est défavorable, il faut y améliorer l'absorption de Mg pour éviter une situation de carence. L'apport doit être fait au plus tôt en février/mars en raison du danger de lessivage (tableau 10). Un apport de Mg en engrais foliaire peut aussi se faire dès la fin de la floraison et jusqu'en juin, afin de stimuler le développement de la chlorophylle et ainsi la photosynthèse sur les sites présentant des problèmes d'absorption de Mg. Informations supplémentaires: Ryser et Heller (1997b), Baab (2009e).

### 3.7 Soufre

Le soufre (S) est un constituant des protéines, acides aminés, pigments et produits intermédiaires du métabolisme. Cet élément est souvent apporté en quantité suffisante avec les produits phytosanitaires et les engrais contenant du soufre. La carence en S (feuilles d'un vert mat restant petites, avec nervures chlorotiques) est donc plutôt rare en arboriculture fruitière.

### 3.8 Bore

Le bore (B) joue un rôle important surtout dans la croissance (méristèmes, division cellulaire) et dans les organes floraux (croissance du tube pollinique). Il inhibe la roussis-



Figure 8. La carence en B entraîne la déformation des fruits et la présence de taches liégeuses dans leur chair (photos: en haut: Karl Bachinger, Landwirtschaftskammer Niederösterreich; en bas: Agroscope).

sure et participe au métabolisme des glucides, à la différenciation des organes et à l'élaboration des parois cellulaires. B active ou désactive les substances de croissance et les hormones. La carence et l'excès de B entraînent la déformation des fruits, le rabougrissement des fleurs (cerisiers), le développement de taches liégeuses dans la chair des fruits, la roussissure ainsi que la mort du tissu méristématique et de l'apex des pousses.

La carence en B (figure 8) se manifeste surtout sur les sols très calcaires ou au pH élevé (> 7,2), en situation de sécheresse, lors d'épisodes de froid et d'humidité stagnante, dans les sols richement pourvus de N, ou sableux et perméables. La carence en B peut être efficacement corrigée par une fertilisation du sol. Cependant, l'étroite zone d'absorption optimale de B peut compliquer la fertilisation. Pour éviter une fertilisation excessive, il faut s'en tenir aux dosages souvent faibles. Sur les sites problématiques, on peut aussi utiliser avec succès des engrais foliaires miscibles avec des produits phytosanitaires (vérifier préalablement la miscibilité). Les apports précoces sont plus efficaces que les apports tardifs. Si nécessaire, on les répète deux à trois fois. Informations supplémentaires: Baab (2012).

### 3.9 Cuivre

Le cuivre (Cu) est un composant du métabolisme des arbres fruitiers (glucides, protéines). Il se trouve également dans les enzymes et participe ainsi au métabolisme de la lignine (lignification des parois cellulaires). La carence en Cu, que l'on voit à des plages claires sur les feuilles des jeunes pousses, se manifeste surtout sur des sols tourbeux et sableux. Elle s'accompagne d'une chute des feuilles, de déformations de l'apex des pousses et de perturbations de la formation des fruits. Dans les vergers, l'excès de cuivre est cependant plus fréquent que la carence, en raison des traitements phytosanitaires. Les concentrations excessives de Cu peuvent avoir des effets négatifs sur la croissance des racines (> 200 mg Cu/kg, Österreicher et Aichner (1998)) et sur les organismes vivants du sol (vers de terre), ainsi que sur l'absorption des éléments K, Fe, Mn et Zn.

### 3.10 Fer et manganèse

Constituant de divers enzymes, le fer (Fe) est ainsi présent dans les chloroplastes et dans la chlorophylle. D'autre part, il est important pour le transport d'énergie dans les processus de photosynthèse et de respiration. Le manganèse (Mn) active de nombreux enzymes dans la plante et participe ainsi à divers processus métaboliques. L'assimilation de Mn et de Fe dépend du pH : fortement fixés dans les sols alcalins, ils ne sont par conséquent souvent disponibles qu'en faibles concentrations pour les plantes. La carence en Mn (figure 9) et en Fe (figure 10) peut être induite par un tassement du sol, un chaulage inadéquat ou une fertilisation excessive de Mg et d'ammonium.

En raison de sa dépendance au pH, l'assimilation de Mn et de Fe ne peut pas être améliorée par un simple apport au sol. C'est pourquoi on utilise surtout, pour Mn et Fe, des engrais foliaires et des engrais chélatés dont le pH est



Figure 9. Les symptômes de carence en Mn se manifestent surtout sur des feuilles entièrement développées, d'âge moyen. Ils se traduisent par des décolorations chlorophylliennes (vert pâle puis jaune terne), diffuses et peu délimitées entre les nervures, lesquelles restent généralement vertes ou entourées d'une large lisière verte. Les nécroses n'apparaissent que très tard ou pas du tout. Poires: jaunissement homogène des feuilles (analogue à la carence en N). Cerises: souvent avec brunissement marginal des feuilles (photos: en haut: Othmar Eicher, Landwirtschaftliches Zentrum Liebegg; en bas: Jeanne Poulet, Union fruitière lémanique).



Figure 10. Avec une carence en Fe, les jeunes feuilles sont jaune vif avant de brunir. Seules les nervures restent vertes (photo: Agroscope).

stable (chapitres 4.5 et 4.6). En règle générale, les besoins en Fe et en Mn sont maximaux après la floraison (tableau 10). Sur les sites problématiques pour la disponibilité dans le sol de Mn et/ou de Fe, un apport peut éventuellement déjà se faire avant la floraison. Des apports complémentaires peuvent s'avérer opportuns en été ou après la récolte (fruits à noyau). Informations supplémentaires: Ryser

et Heller (1997a), Ryser et Heller (1997c), Baab (2009d) et Baab (2009g).

### 3.11 Zinc

Le zinc (Zn) active une série d'enzymes et se trouve ainsi impliqué dans la division et l'allongement des cellules, ainsi que dans les processus métaboliques. Les déficits de Zn se manifestent surtout dans les sols lourds, organiques, compactés (humidité stagnante) ou alcalins ( $\text{pH} > 7,2$ ). La carence en Zn entraîne des problèmes de croissance des racines et des pousses ainsi que la chute des fleurs et des feuilles. Elle peut s'accompagner d'un retard de maturation des fruits, qui restent petits. La carence en Zn s'observe d'abord sur les feuilles exposées au soleil et plus âgées (elles sont alors petites, étroites, dressées en rosettes et de forme lancéolée avec des décolorations chlorophylliennes en mosaïque). Les nervures sont bordées d'une lisière habituellement ondulée, parfois fortement dentée. Les chloroses sont présentes surtout chez les jeunes feuilles.

L'excès de Zn représente un problème surtout dans les sols acides. Il peut aboutir à la destruction de la chlorophylle accompagnée d'une croissance déprimée. En règle générale, on apporte du Zn en fertilisation foliaire. Informations supplémentaires: Baab (2009c).

## 4. Technique de fertilisation

### 4.1 Fertilisation distribuée ou localisée

Dans un verger, l'apport d'engrais peut être réparti sur toute la surface au moyen d'un semoir à engrais, ou localisé sur les lignes au moyen d'une installation adéquate, ou encore à la main (figure 11). L'apport localisé sur les lignes est surtout intéressant dans les vergers greffés sur des



Figure 11. Semoir à engrais: fertilisation distribuée dans tout l'espace occupé par les racines ainsi que sur les interlignes (photo: Thomas Kuster, Agroscope).

porte-greffes faibles dont les racines ne prospectent pas plus loin que la largeur de la ligne. Mais un apport occasionnel sur toute la surface peut contribuer à donner de la vigueur au gazon d'enherbement dans l'interligne. Si la fertilisation ne concerne que les lignes, les échantillons pour les analyses doivent être prélevés sur les lignes uniquement (chapitre 2.3.1).

Les apports d'engrais sont calculés pour toute la surface du verger. Si l'engrais n'est apporté que localement sur les lignes, le dosage réel de P, K et Mg est triplé par rapport à la surface réellement fertilisée puisque les lignes représentent environ le tiers de la surface totale du verger (figure 1). Concernant N, il est recommandé dans ce cas de réduire d'un tiers le dosage par hectare, ce qui correspond à un apport localisé avec le double du besoin calculé. Il ne faut pas apporter de quantités plus élevées de N, afin d'éviter des dégâts sur les arbres, une baisse de la qualité des fruits et un lessivage des éléments nutritifs.

### 4.2 Replantation et fertilisation des jeunes vergers

À la différence d'autres cultures, les vergers restent en place durablement. Le changement de culture n'est possible qu'après un grand nombre d'années, voire de décennies. La structure hétérogène du verger, les dispositifs fixes de protection contre les intempéries, les installations de traitement et d'irrigation compliquent le déplacement des lignes lors d'une replantation. Si l'on replante un verger sur la même parcelle, voire sur les mêmes lignes que le précédent, c'est avec un risque de baisse de croissance et de rendements (fatigue du sol, voir aussi le projet Steinhobsterben: Bosshard et al. 2004). Cette fatigue du sol peut avoir des causes liées à la physique ou à la chimie du sol, à l'activité de champignons ou d'animaux nuisibles. Si la fatigue du sol est à craindre, il faut envisager un changement d'espèce ou de variété, une pause avec engrais verts ou un déplacement des lignes de plantation. De plus, en



Figure 12. Compost de champignonnière en amendement sur une replantation de pruniers (photo: Thomas Schwizer, Agroscope).



cas de problèmes dans une replantation, il est recommandé d'apporter un amendement de compost (voir aussi figure 12, chapitre 4.3). La préparation du sol devrait comporter, déjà sur la culture précédente, un apport de fumier, de digestat ou d'engrais organique liquide.

La fertilisation des jeunes vergers doit être adaptée au développement des plantes au cours de leur phase de croissance. Les jeunes arbres ont besoin de quantités importantes d'éléments nutritifs pour élaborer les éléments de leur structure (racines, tronc, branches). C'est pourquoi, malgré l'absence de récolte, une jeune plantation doit recevoir des éléments nutritifs en quantité suffisante, selon les besoins spécifiques des arbres. Cependant, les arbres jeunes ou peu vigoureux ne sont pas capables, en raison d'un système racinaire encore peu développé, d'absorber des quantités trop importantes d'éléments nutritifs. C'est pourquoi, la fertilisation doit être apportée localement sur les lignes des jeunes vergers. Le calcul des besoins en engrais (y compris les corrections) se fait selon une estimation de rendement d'un verger adulte. La fertilisation commencera selon la moitié de cette prévision pour gagner progressivement la valeur de la norme lorsque le plein rendement sera atteint. La durée de cette phase de progression dépend de la parcelle, de la stratégie de production, de la croissance et de la qualité des plantes et dure au maximum cinq ans.

### 4.3 Engrais organiques

La fertilisation printanière avec des matériaux organiques (compost, fumier bien décomposé, lisier etc.), en alternative aux engrais minéraux, présente plusieurs avantages. La matière organique doit être dégradée par la microfaune du sol, ce qui non seulement stimule les propriétés biologiques du sol et la mycorhization, mais permet aussi (sauf pour les engrais organiques liquides, p. ex. le lisier) la libération continue et durable des éléments nutritifs dans la solution du sol. Le nombre de passages de machines dans les interlignes est diminué, ce qui réduit le risque de compactage du sol, surtout s'il est humide. L'apport de matériaux organiques et le surcroît d'activité biologique qui lui est lié maintiennent voire améliorent la teneur en matière organique et la structure grumeleuse du sol, ce qui influence positivement la circulation d'eau et d'air. Le compost apporté en couverture exerce durant la première année une influence inhibitrice sur les adventices. Il réduit aussi l'évaporation et maintient ainsi une bonne humidité du sol, surtout en situation de sécheresse, et contribue à limiter les dégâts de gel. Selon la qualité et le degré de décomposition du compost, il peut aussi inhiber les champignons nuisibles du sol, ce qui est intéressant en cas de problèmes liés aux replantations (chapitre 4.2). L'apport de matière organique (particulièrement de compost) est une mesure importante pour l'amélioration d'un sol et d'un site, surtout dans le cas de cultures de longue durée comme les vergers.

Des apports excessifs de compost peuvent avoir des effets négatifs sur un verger. Si les sols sont détrempés, une couverture avec de la matière organique peut renforcer le

compactage mécanique. Le danger d'infestation de campagnols peut aussi augmenter. De plus, le compost est souvent riche en K et en N (voir chapitre 3, module 4), ce qui peut entraîner une concurrence pour l'absorption ou des problèmes physiologiques en cas d'apport en grande quantité. D'une façon générale, la teneur en minéraux de la substance organique doit être aussi basse que possible, car la norme fixe une quantité maximale d'apport des différents éléments nutritifs, surtout pour P. Dans tous les cas, il faut exiger du fournisseur une analyse récente des éléments nutritifs contenus dans l'engrais organique.

Il faut aussi accorder une attention particulière à la qualité du compost. Elle doit répondre aux lignes directrices de la branche (Abächerli *et al.* 2010). La teneur en métaux lourds et en corps étrangers (matériaux synthétiques, verre, métal, etc.) doit être inférieure aux valeurs limites (ORRChim) et le compost ne doit contenir aucun organisme indésirable (graines, néophytes, pathogènes) (OEng). Le degré de décomposition doit être optimal pour la culture et aussi homogène que possible. On trouvera des informations supplémentaires auprès de Biomasse Suisse ([www.biomassesuisse.ch](http://www.biomassesuisse.ch)) ou du CVIS (Inspectorat suisse du compostage et de la méthanisation, [www.cvis.ch](http://www.cvis.ch)).

Pour éviter des effets indésirables dus à des apports excessifs de compost, l'apport dans un but de fertilisation est limité à un maximum de 25 t de matière sèche par ha sur trois ans, ce qui correspond à peu près à 50 t/ha de poids frais ou 100 m<sup>3</sup> de compost. L'apport en tant qu'amendement est limité à un maximum de 100 t de matière sèche par ha sur 10 ans, correspondant à peu près à 200 t/ha de poids frais ou 400 m<sup>3</sup> de compost (ORRChim, OFEV et OFAG 2012). Une autorisation spéciale de l'office cantonal compétent est nécessaire si un amendement organique dépasse la norme de fertilisation (Directives suisses pour les prestations écologique requises (PER) en culture fruitière). Informations supplémentaires dans le module 4.

### 4.4 Fertigation et engrais liquides

Lorsqu'un verger est irrigué au moyen d'un système goutte-à-goutte ou par micro-aspersion (Monney et Bravin 2011), l'apport de la fertilisation peut se faire par le système d'irrigation (fertigation, figure 13). Cette technique est intéressante surtout pour les cultures intensives sur porte-greffes faibles ou pour les cultures bâchées (cerisiers). L'apport des éléments facilement lessivables peut être réparti dans le temps, ce qui présente des avantages surtout pour N et parfois aussi pour Mg. Au printemps, époque d'apport de la plupart des engrais, le sol est souvent assez humide sans irrigation. L'application d'engrais se fait alors sous forme concentrée avec un apport minimal d'eau. Les conduites doivent être purgées à l'eau après chaque apport d'engrais liquide, afin d'éviter des dépôts.

À part l'apport par fertigation, les engrais liquides peuvent être aussi distribués par des installations mobiles (barre de traitement herbicide, lance portative). N en particulier peut être apporté pendant ou après la floraison au moyen de la barre de traitement, sous forme par exemple de nitrate de



Figure 13. L'irrigation localisée permet d'apporter les engrais directement dans la zone des racines (photo: Thomas Schwizer, Agroscope).

calcium ou de potassium dissous. La fertigation ou la fertilisation liquide ne présentent cependant pas d'avantage général sur l'apport granulé, mais N sous forme liquide peut cibler précisément l'espace racinaire et les éléments nutritifs sont plus rapidement assimilables par les plantes car ils sont déjà dissous au moment de parvenir dans le sol. L'apport supplémentaire d'eau, qui assure une meilleure répartition des éléments nutritifs dans le sol, peut représenter un aspect positif de la fertilisation liquide, surtout en années sèches. Il faut prêter attention à la quantité de sels dissous dans la solution nutritive des engrais liquides. Une valeur de salinité trop faible peut entraîner une carence en éléments nutritifs et une valeur trop élevée peut occasionner un manque d'eau. La salinité se mesure par la conductivité électrique (electric conductivity [EC], mS/cm). La salinité optimale d'une solution nutritive dépend de la culture, des conditions météorologiques et de la salinité du sol. Il n'y a donc pas de recommandations universelles possibles. La fertigation et les engrais liquides doivent être pris en compte dans le plan de fertilisation et donc dans le bilan de fertilisation de l'ensemble de l'exploitation.

#### 4.5 Engrais foliaires

L'absorption des éléments nutritifs par les arbres fruitiers se fait principalement par l'intermédiaire des racines. Si l'on ne peut pas atteindre l'effet souhaité par un apport au sol, il est possible de compléter l'apport en éléments nutritifs par une fertilisation foliaire. Dans les sols à teneur élevée en Ca ou en K par exemple, il n'est pas possible d'augmenter l'assimilation de Mg, B, Fe ou Mn par un apport au sol car ces éléments sont très rapidement fixés dans le sol, ou ne peuvent pas être assimilés en raison d'antagonismes lorsque le pH est élevé (sauf s'il s'agit d'engrais chélatés, voir chapitre 4.6). De même, les engrais foliaires peuvent apporter un soutien utile après une nouaison consécutive à une floraison abondante impliquant une

forte demande en éléments nutritifs. L'effet d'une fertilisation foliaire ne doit cependant pas être surestimé. Elle ne doit être appliquée que si l'on fait face à des difficultés dans la gestion de la culture. Une fertilisation foliaire post-récolte ne doit être appliquée que si le feuillage est sain et qu'il reste suffisamment de temps pour la mise en réserve. Des études ont montré que la fertilisation foliaire n'augmentait pas les récoltes en quantité ou en qualité, et qu'elle n'influçait pas non plus l'apparition de l'alternance lorsque l'apport d'éléments nutritifs était assuré suffisamment par le sol (Widmer *et al.* 2005, 2006; Kuster et Schweizer 2015): en effet, seule une petite partie de l'ensemble des besoins nutritifs peut être assimilée par l'intermédiaire du feuillage. Les engrais foliaires ne sont donc justifiés ni économiquement ni écologiquement pour des vergers homogènes et sains.

En règle générale, les fertilisations foliaires sont amenées en apports fractionnés afin de réduire les pertes. Les engrais foliaires doivent absolument être pulvérisés dans les quantités de produits et d'eau indiquées (en règle générale 1'000 l/ha). Ils ne doivent pas être concentrés comme les produits phytosanitaires. C'est la raison pour laquelle il ne faut pas mélanger les engrais foliaires avec les produits phytosanitaires. Si les engrais foliaires sont mélangés à d'autres engrais foliaires ou malgré tout à des produits phytosanitaires, il faut respecter les indications d'application afin d'éviter une phytotoxicité ou un manque d'efficacité. Les appareils d'aspersion doivent être nettoyés à fond avant et après l'application.

Les engrais foliaires sont absorbés passivement à travers la cuticule des feuilles. Cela signifie que l'arbre ne peut pas influencer activement l'absorption des éléments nutritifs, à la différence de l'absorption par les racines. L'effet des engrais foliaires dépend de facteurs tels les conditions météorologiques (surtout l'humidité), le type d'engrais (propriétés hygroscopiques, dosage, qualité d'humectation), le stade de développement des fleurs, des feuilles et des fruits (Baab 2009f). La rapidité d'absorption des éléments nutritifs augmente avec l'hygrométrie qui favorise la turgescence de l'épiderme. Lorsque l'hygrométrie est basse, les engrais foliaires sèchent rapidement et cristallisent à la surface des feuilles avant que celles-ci aient pu les absorber. Si le temps de ressuyage est trop long, il y a un risque de brûlures du feuillage. D'une façon générale, l'aspersion d'engrais foliaire ne doit pas se faire par temps chaud (> 25 °C), et le dosage doit être réduit au-dessus de 20 °C.

Un dosage excessif ou une concentration trop élevée peuvent endommager les fleurs ou les feuilles; il convient donc de fractionner l'apport d'engrais foliaires en plusieurs applications avec de plus petites quantités plutôt qu'en une seule application. Dans tous les cas, il faut suivre précisément les consignes d'utilisation des différents produits.

Les engrais foliaires sont disponibles sous forme de sels ou de produits déjà formulés. Ces derniers comportent des adjuvants permettant une meilleure absorption des engrais par l'épiderme des feuilles. Selon l'élément nutritif et

les conditions d'utilisation, l'une des formulations (chélate, nitrate, formulation en suspension, sulfate) conviendra mieux qu'une autre.

#### 4.6 Engrais chélatés

Sur les sites où l'alimentation minérale pose des problèmes, on peut utiliser, en complément aux engrais ordinaires apportés au sol, des engrais chélatés en alternative aux engrais foliaires. Stables dans une large plage de pH, les engrais chélatés sont en général disponibles pour les plantes sur une longue durée dans les sols. Ainsi, l'approvisionnement en Ca dans les sols acides et celui en Mg, B, Fe et Mn dans les sols calcaires peut être assuré par l'intermédiaire des racines. L'apport des engrais chélatés doit se faire autant que possible par fertigation (chapitre 4.4), par pal injecteur ou par des procédés comparables d'injection mécanique (Baab 2009g). Toutefois, l'apport des engrais chélatés peut aussi se faire par pulvérisation, par exemple au moyen d'une barre de traitement ou d'un pulvérisateur à herbicides. En raison de leur stabilité réduite au rayonnement UV, l'apport des engrais chélatés en surface ne doit se faire qu'en soirée et avant un arrosage ou un épisode de précipitations. Selon le produit utilisé et le moment de l'apport, les engrais chélatés peuvent être appliqués avec un herbicide.

Il y a de grandes différences qualitatives entre les différents engrais chélatés applicables au sol, quant à la stabilité dans une certaine plage de pH. Il convient de surtout vérifier la stabilité des pH élevés. Par exemple, dans les engrais chélatés contenant du Fe, c'est sous la forme ortho-ortho (o,o) que celui-ci est le plus fortement lié. La liaison ortho-para (o,p) est moins stable lorsque les valeurs de pH sont élevées. La forme para-para (p,p) présente la stabilité la moins élevée. Il faut donc vérifier à l'achat quelle est la forme de liaison. Les engrais chélatés peuvent aussi être apportés en application foliaire, à l'exception de ceux qui contiennent de l'EDTA.

#### 4.7 Fertilisation des vergers haute tige

Les besoins nutritifs des arbres haute tige sont calculés selon les besoins moyens annuels par arbre (0,45 kg N, 0,15 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 0,56 kg K<sub>2</sub>O et 0,08 kg Mg) ou selon le rendement annuel de fruits (1,5 kg N, 0,5 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 1,8 kg K<sub>2</sub>O et 0,25 kg Mg, par tonne de rendement de fruits). Toutefois, le prélèvement d'éléments nutritifs par la végétation sous couverture (prairie) est en règle générale nettement supérieur au prélèvement par les arbres eux-mêmes (figure 14). C'est pourquoi les besoins en éléments nutritifs des vergers haute tige varient surtout en fonction de l'intensité d'exploitation des prairies. La fertilisation de celles-ci se calcule selon le module 9. Pour tenir compte des incertitudes quant aux valeurs indicatrices, il convient de vérifier tous les cinq ans l'état d'approvisionnement du verger haute tige au moyen d'analyses de sol. En moyenne, la norme de fertilisation d'arbres en production (y compris l'exploitation de la végétation sous couverture) est de 150 kg N, 100 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 300 kg K<sub>2</sub>O et 50 kg Mg par hectare et par an.

À la différence de ce qui se fait en arboriculture proprement dite, la fertilisation des vergers haute tige se fait principalement avec des engrais de ferme. Il est recommandé d'apporter au printemps (février–mars) une quantité modérée (20 t/ha) de fumier (tableau 10). Selon les conditions climatiques, la croissance des pousses des arbres et l'intensité d'exploitation de la prairie, il sera nécessaire de compléter cet apport par un, voire deux apports de lisier (20 m<sup>3</sup> par apport). Le dernier apport de lisier doit se faire avant le début de juillet, afin d'éviter un aoûtement trop tardif des pousses avec la conséquence possible de dégâts de gel. Sur les surfaces prises en compte pour les PER, on n'utilisera que le pal injecteur pour la fertilisation des arbres. Ce procédé permet un apport ciblé des engrais dans l'espace des racines d'un arbre de verger haute tige.



Figure 14. Dans un verger haute tige, le prélèvement d'éléments nutritifs par l'exploitation de la végétation sous couverture est en règle générale supérieur au prélèvement par les arbres fruitiers eux-mêmes (photo: Richard Hollenstein, Landwirtschaftliches Zentrum SG).

On applique à cet effet un litre d'une solution aqueuse (6–8 %) d'engrais complet par cm de diamètre de tronc (deux piqûres par m<sup>2</sup> et par l d'engrais).

#### 4.8 Fertilisation en arboriculture bio

L'agriculture bio, comme l'agriculture conventionnelle, vise un apport optimal en éléments nutritifs nécessaires et adapté aux besoins, afin de permettre une récolte qui respecte les plus hauts standards de qualité et de quantité. Cependant, le choix restreint d'engrais et de produits phytosanitaires en agriculture bio exige que l'on accorde une attention particulière à l'établissement et au maintien d'une fertilité élevée du sol, à l'équilibre entre la croissance végétative et la croissance générative ainsi qu'à la bonne santé des arbres. C'est pourquoi la fertilisation doit être harmonisée avec les autres mesures de gestion des cultures. Pour des informations supplémentaires, consulter

le module 6 ainsi que la liste des produits éditée par l'Institut de recherche de l'agriculture biologique FiBL (<https://shop.fibl.org/fr/publication/c/ldi.html>) et les lignes directrices de BioSuisse (<http://www.bio-suisse.ch/fr/producteurs2.php>).

## 5. Bibliographie

- Abächerli F., Baier U., Berner F., Bosshard C., Fuchs J., Galli U., Gfeller H., Leuenberger R., Mayer J., Pfaffen P., Schleiss K., Trchsel D. & Wellinger A., 2010. Directive suisse 2010 de la branche sur la qualité du compost et du digestat. Commission de l'inspectorat de la branche suisse du compostage et de la méthanisation (éd.), Biogaz Forum, Kompostforum Schweiz, Groupement d'intérêts des installations (IGA) du Kompostforum Schweiz, Association suisse des installations de compostage et de méthanisation (ASIC) et sa section romande, le Groupement des compostières professionnelles GCP. Accès: [https://www.biomassesuisse.ch/files/biomasse\\_temp/data/Das\\_bieten\\_wir/Ligne\\_directrice\\_2010\\_web.pdf](https://www.biomassesuisse.ch/files/biomasse_temp/data/Das_bieten_wir/Ligne_directrice_2010_web.pdf) [16. 11. 2016].
- Agroscope, 1996. Méthodes de référence des stations de recherche Agroscope, Volume 1: Analyse de terre et du substrat pour conseil de fumure, édition 2015.
- Baab G., 2004. Die Blattanalyse – ein wichtiger Beitrag zum Leistungszustand der Blätter. *Kernobst* 29 (8), 417–421.
- Baab G., 2009a. Damit sie keinen Mangel leiden – Die wichtigsten Nährstoffe im Obstbau, Teil 1: Kalium. *Besseres Obst* 54 (1), 16–19.
- Baab G., 2009b. Damit sie keinen Mangel leiden – Die wichtigsten Nährstoffe im Obstbau, Teil 2: Phosphor. *Besseres Obst* 54 (3), 20–23.
- Baab G., 2009c. Damit sie keinen Mangel leiden – Die wichtigsten Nährstoffe im Obstbau, Teil 3: Zink. *Besseres Obst* 54 (4), 20–24.
- Baab G., 2009d. Damit sie keinen Mangel leiden – Die wichtigsten Nährstoffe im Obstbau, Teil 4: Mangan. *Besseres Obst* 54 (5), 13–16.
- Baab G., 2009e. Damit sie keinen Mangel leiden – Die wichtigsten Nährstoffe im Obstbau, Teil 5: Magnesium. *Besseres Obst* 54 (6), 12–16.
- Baab G., 2009f. Damit sie keinen Mangel leiden – Die wichtigsten Nährstoffe im Obstbau, Teil 6: Calcium. *Besseres Obst* 54 (7), 18–21.
- Baab G., 2009g. Damit sie keinen Mangel leiden – Die wichtigsten Nährstoffe im Obstbau, Teil 7: Eisen. *Besseres Obst* 54 (8), 15–18.
- Baab G., 2009h. Damit sie keinen Mangel leiden – Die wichtigsten Nährstoffe im Obstbau, Teil 8: Stickstoff. *Besseres Obst* 54 (10–11), 22–26.
- Baab G., 2012. Das Spurennährelement Bor. *European Fruit Magazine* 2012 (3), 28–32.
- Batjer L., Rogers B. & Thompson A., 1952. Fertilizer applications as related to nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, and magnesium utilization by apple trees. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science* 60, 1–6.
- Bergmann W., 1993. Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen: Entstehung, visuelle und analytische Diagnose. Spektrum Akademischer Verlag, Jena.
- Bertschinger L., Gysi C., Häseli A., Neuweiler R., Pfammatter W., Ryser J.-P., Schmid A. & Weibel F., 2003. Données de base pour la fumure en arboriculture fruitière. Eidgenössische Forschungsanstalt für Obst-, Wein- und Gartenbau, Wädenswil, Nyon. 48 p.
- Bosshard E., Rüegg J. & Heller W., 2004. Bodenmüdigkeit, Nachbauprobleme und Wurzelkrankheiten. *Schweizerische Zeitschrift für Obst- und Weinbau* 140 (10), 6–9.
- OEng, 2001. Ordonnance sur la mise en circulation des engrais. Le Conseil fédéral suisse, Bern. Accès: <https://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/20002050/index.html> [14. 11. 2016].
- OFAG, 2013. Ordonnance sur les paiements directs 2016. Office fédéral de l'agriculture OFAG, Bern. Accès: <https://www.blw.admin.ch/blw/fr/home/instrumente/direktzahlungen.html> [4. 11. 2016].
- OFEV & OFAG, 2012. Eléments fertilisants et utilisation des engrais dans l'agriculture. Un module de l'aide à l'exécution pour la protection de l'environnement dans l'agriculture. Office fédéral de l'environnement OFEV, Bern. 63 p.
- GTPI, 2017. Directives Suisse pour les prestations écologiques requises (PER) en culture fruitière. Schweiz. Groupe de travail pour la production fruitière intégrée en Suisse (GTPI), Fruit-Union Suisse, Zug. Accès: [http://members.swissfruit.ch/fr/system/files/2017-01/GTPI-directives-2017\\_0.pdf](http://members.swissfruit.ch/fr/system/files/2017-01/GTPI-directives-2017_0.pdf) [29. 03. 2017].
- Kuster T. & Schweizer S., 2015. L'urée foliaire après récolte: Adapter l'épandage à la charge fruitière. *Fruits & Légumes* 2015 (6), 12–13.
- Monney P. & Bravin E., 2011. Irrigation des arbres fruitiers. Station de recherche Agroscope Changins-Wädenswil, Wädenswil. 27 p.
- ORRChim, 2005. Ordonnance sur la réduction des risques liés à l'utilisation de substances, de préparations et d'objets particulièrement dangereux. Le Conseil fédéral suisse, Bern. Accès: <https://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/20021520/index.html> [14. 11. 2016].
- Österreicher J. & Aichner M., 1998. Kupfergehalt beeinflusst Baumwachstum. *Obstbau Weinbau* 35 (1), 18–20.
- Ryser J.-P. & Heller W., 1997a. La chlorose ferrique en arboriculture. Station de recherche Agroscope Changins-Wädenswil, Wädenswil ACW, Wädenswil.
- Ryser J.-P. & Heller W., 1997b. La carence en magnésium en arboriculture. Station de recherche Agroscope Changins-Wädenswil, Wädenswil ACW, Wädenswil.
- Ryser J.-P. & Heller W., 1997c. La carence en manganèse en arboriculture. Station de recherche Agroscope Changins-Wädenswil, Wädenswil ACW, Wädenswil.
- Scheffer F., Schachtschabel P., Blume H.-P. & Thiele-Bruhn S., 2010. *Lehrbuch der Bodenkunde*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. 569 p.
- Stünzi H., 2006. L'extraction du P avec acétate d'ammonium + EDTA (AAE10). *Agrarforschung* 13 (11–12), 488–493.
- Widmer A., Bünter M. & Stadler A., 2006. Blattdüngung: Ergebnisse aus der Praxis. *Schweizerische Zeitschrift für Obst- und Weinbau* 2006 (20), 9–12.
- Widmer A., Stadler A. & Krebs C., 2005. Regelmässige Erträge dank Blattdüngung. *Schweizerische Zeitschrift für Obst- und Weinbau* 2005 (13), 6–9.

## 6. Liste des tableaux

Tableau 1. Normes de fertilisation pour fruits à pépins et à noyau, ainsi que pour le kiwi, en rapport avec le rendement. ....	13/4
Tableau 2. Besoins annuels d'éléments nutritifs des différents organes des pommiers. ....	13/4
Tableau 3. Correction de la fertilisation N pour fruits à noyau et à pépins. ....	13/4
Tableau 4. Correction de la fertilisation N pour les vergers de kiwi. ....	13/4
Tableau 5. Correction de la fertilisation P, K et Mg pour les fruits à pépins et à noyau ainsi que pour le kiwi. ....	13/5
Tableau 6. Analyses de sol obligatoires et recommandées en arboriculture. ....	13/5
Tableau 7. Exemple de calcul des besoins en engrais pour un verger de pommiers fictif en plein rendement. ....	13/7
Tableau 8. Valeurs de référence des analyses foliaires d'une culture fruitière à mi-juin. ....	13/8
Tableau 9. Valeurs de référence des analyses foliaires d'une culture fruitière en juillet/août (75–105 jours après la pleine floraison). ....	13/8
Tableau 10. Echantillonnage, fertilisation du sol et fertilisation foliaire au cours de l'année pour les fruits à pépins et les fruits à noyau. ....	13/9

## 7. Liste des figures

Figure 1. Schéma de prélèvement d'échantillons de sol, dans le cas où l'engrais est distribué sur toute la parcelle ou lorsque l'engrais est apporté localement sur des terrasses ou sur les lignes. ....	13/5
Figure 2. Avec une tarière, on prélève 12–20 échantillons représentatifs par parcelle à des profondeurs de 2–25 cm et 25–50 cm. ....	13/6
Figure 3. Pour l'analyse des feuilles, prélever au maximum deux feuilles par arbre, chacune au milieu d'une pousse de l'année. Les feuilles qui ne sont pas représentatives de l'arbre (ou du verger) quant à la forme, à la couleur ou à l'angle d'insertion, ne doivent pas être utilisées. ....	13/8
Figure 4. Carence en P. ....	13/11
Figure 5. Carence en K. ....	13/11
Figure 6. Carence en Ca. ....	13/11
Figure 7. Carence en Mg. ....	13/12
Figure 8. Carence en B. ....	13/12
Figure 9. Carence en Mn. ....	13/13
Figure 10. Carence en Fe. ....	13/13
Figure 11. Semoir à engrais: fertilisation distribuée dans tout l'espace occupé par les racines ainsi que sur les interlignes. ....	13/14
Figure 12. Compost de champignonnière en amendement sur une replantation de pruniers. ....	13/14
Figure 13. L'irrigation localisée permet d'apporter les engrais directement dans la zone des racines. ....	13/16
Figure 14. Dans un verger haute tige, le prélèvement d'éléments nutritifs par l'exploitation de la végétation sous couverture est en règle générale supérieur au prélèvement par les arbres fruitiers eux-mêmes. ....	13/17





## 14/ Fertilisation des cultures de baies

Christoph Carlen et André Ançay  
Agroscope, 1964 Conthey, Suisse

Renseignements: [christoph.carlen@agroscope.admin.ch](mailto:christoph.carlen@agroscope.admin.ch)

## Table des matières

1. Introduction .....	14/3
2. Buts et principes d'une fertilisation raisonnée .....	14/3
3. Normes de fertilisation .....	14/3
4. Fertilisation des fraises .....	14/3
4.1 Fertilisation azotée .....	14/3
4.2 Fertilisation phosphatée, potassique, magnésienne et en micro-éléments .....	14/4
5. Fertilisation des framboises, mûres, groseilles et des cultures alternatives d'arbustes à baies .....	14/5
5.1 Fertilisation azotée .....	14/5
5.2 Fertilisation phosphatée, potassique et magnésienne .....	14/6
6. Fertilisation des myrtilles .....	14/6
7. Fertilisation par goutte-à-goutte .....	14/6
8. Fraises, framboises et mûres sur substrat .....	14/7
8.1 Substrat .....	14/7
8.2 Solution nutritive .....	14/7
8.3 Préparation de la solution nutritive à partir d'engrais complets .....	14/8
8.4 Préparation de la solution nutritive à partir d'engrais simples .....	14/8
8.5 Apport de la solution nutritive .....	14/9
8.6 Adaptation de la solution nutritive .....	14/9
8.7 Système ouvert ou fermé .....	14/10
9. Bibliographie .....	14/10
10. Liste des tableaux.....	14/11
11. Liste des figures.....	14/11

Couverture: framboisier sur substrat (photo: Agroscope).



## 1. Introduction

Les principes de fertilisation des baies contiennent les informations les plus importantes pour une fertilisation raisonnée des baies, afin de fournir à la plante une nutrition minérale équilibrée tout en respectant l'environnement. Les diverses normes de fertilisation ont été élaborées sur la base d'expériences d'Agroscope, du Guide des petits fruits (Ançay *et al.* 2012), des Données de base pour la fumure en arboriculture fruitière (Bertschinger *et al.* 2003), des Données de base pour la fumure des cultures de légumes, de fleurs et de fraises sur substrat (Pivot *et al.* 2005), ainsi que d'autres publications sur les cultures sur substrat (Lieten 1999; Guérineau 2003; Pivot et Gillioz 2000).

## 2. Buts et principes d'une fertilisation raisonnée

L'objectif d'une fertilisation raisonnée consiste à fournir à la plante une nutrition minérale équilibrée et adaptée, afin d'assurer sa croissance optimale et une production de qualité tout en maintenant la fertilité des sols et en respectant l'environnement. Pour les fraises, la norme de fertilisation concernant les éléments minéraux principaux tels que phosphore (P), potassium (K) et magnésium (Mg), correspond aux quantités exportées par la récolte d'une culture, dans un site adapté et sur un sol normalement pourvu en éléments fertilisants et en eau. Pour les baies à arbustes, la norme de fertilisation correspond aux éléments fertilisants exportés par les récoltes, ainsi que les éléments fixés dans le bois.

La norme de fertilisation pour P, K et Mg peut être adaptée au rendement estimé et corrigée en fonction de la fertilité du sol. La fertilité de sols trop riches ou trop pauvres est rééquilibrée par le biais d'un suivi régulier de la richesse en P, K et Mg et par une correction correspondante de la norme de fertilisation. Ces mesures permettent d'éviter des carences et déséquilibres nutritionnels (antagonismes) préjudiciables à la culture.

En revanche, la norme pour la fertilisation azotée est définie en considérant aussi la minéralisation de l'azote (N) du sol d'un site avec des conditions pédoclimatiques moyennes. La norme de fertilisation azotée peut être adaptée proportionnellement au rendement estimé, ainsi qu'au comportement végétatif de la plante. En cas de besoin en N supérieur à 60 kg N/ha, les apports doivent être fractionnés pour réduire les pertes par lessivage.

## 3. Normes de fertilisation

Les normes de fertilisation des différentes cultures de baies représentent les besoins en éléments fertilisants pour obtenir un bon rendement et une récolte de qualité sur un sol normalement pourvu (tableau 1). Pour P, K et Mg, les quantités d'éléments nutritifs à apporter sont corrigées sur la base d'une analyse de terre.

## 4. Fertilisation des fraises

### 4.1 Fertilisation azotée

Afin de réduire le risque de lessivage du N, il faut fractionner les apports (tableau 2). De plus, la fumure azotée doit être apportée uniquement sur la ligne de culture. Dans ce cas, la norme peut être réduite d'un tiers (tableau 2; figure 1).

La fertilisation azotée peut être pilotée à l'aide d'analyses  $N_{\min}$ . Cette dernière donne les quantités de N immédiatement disponibles pour la plante à 0 – 30 cm de profondeur du sol. Il est recommandé d'effectuer des analyses  $N_{\min}$  après la plantation, en début de végétation au printemps et à la floraison, afin de suivre la dynamique du N dans le sol et de gérer au mieux les apports azotés. Si le résultat de l'analyse est inférieur à 60 kg N/ha, une fertilisation azotée sera nécessaire. Par contre, si la valeur  $N_{\min}$  est égale ou supérieure à 60 kg N/ha, il n'est pas nécessaire d'apporter du N. Un excès de N favorise le développement du feuillage au détriment du rendement et de la qualité. L'interprétation de l'analyse  $N_{\min}$  doit aussi tenir compte de la vigueur de la culture.

Dans une culture vigoureuse avec une mise à fruits moyenne, il ne faut plus apporter de N à partir de la fin de la floraison. Un excès de N conduit à une baisse de la qualité des fruits et à une augmentation du risque de pourriture. Par contre, dans une culture avec une très forte mise à fruits, il est nécessaire de poursuivre les apports azotés durant la récolte afin de favoriser la formation de nouvelles feuilles.

Des analyses  $N_{\min}$  démontrent que la teneur en N directement disponible pour la plante est plus élevée dans un système de culture sur buttes (Neuweiler *et al.* 1997). Pour ce type de production, il n'est donc souvent pas nécessaire d'apporter de N l'année de plantation. L'apport de N se fait sous forme de nitrate de chaux dans les sols ayant un pH plutôt acide et sous forme de sulfates d'ammonium dans les sols ayant un pH plutôt alcalin.



Figure 1. Fraise, début de floraison. Les fraises sont les plus importantes cultures de baies en Suisse (photo: Agroscope).

Tableau 1. La norme de fertilisation est indiquée en fonction du rendement estimé (Bertschinger *et al.* 2003; Ançay *et al.* 2012).

Culture	Rendement (kg/m <sup>2</sup> )	Norme de fertilisation (kg/ha)					
		N	P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K	K <sub>2</sub> O	Mg
Fraise	1,5	80	10	23	65	79	15
	2,0	100	15	34	100	121	20
	2,5	120	20	46	130	157	25
Framboise	1,0	30	5	11	35	42	10
	1,5	45	10	23	50	61	15
	2,0	60	15	34	65	79	15
	2,5	75	20	46	80	97	20
Mûres	1,5	40	10	23	35	42	15
	2,0	55	15	34	55	67	15
	2,5	70	20	46	70	85	20
Groseilles à grappes	1,5	60	15	34	75	91	15
	2,0	85	20	46	100	121	15
	2,5	110	25	57	125	151	20
Cassis	1,5	50	15	34	70	85	15
	2,0	70	20	46	100	121	15
	2,5	90	25	57	130	157	20
Groseilles à maquereau	1,2	40	10	23	50	61	15
	1,7	60	15	34	65	79	15
	2,2	80	20	46	90	109	20
Myrtilles	1,5	50	5	11	55	67	15
	2,0	55	10	23	60	73	20
	2,5	60	15	34	65	79	25
Cultures alternatives d'arbustes à baies: sureau, mini-kiwi, goji, aronia, lonicera	1,0	35	10	23	50	61	10
	1,5	60	15	34	75	91	15
	2,0	85	20	46	100	121	15
	2,5	110	25	57	125	151	20

## 4.2 Fertilisation phosphatée, potassique, magnésienne et en micro-éléments

Pour les éléments peu lessivables (P, K, Mg), les engrais du commerce sont à épandre avant la préparation du sol. Les fraisiers apprécient les sols riches en humus. La fertilisation organique joue un double rôle: elle maintient la fertilité du sol et en améliore la structure. Pour couvrir les besoins de la plante, on peut apporter 15 à 30 m<sup>3</sup>/ha de fumier tous les trois à quatre ans, ou du compost au maximum 25 t MS/ha tous les trois ans. Le fumier mûr est mieux adapté pour les fraises que le fumier frais. Les éléments fertilisants ainsi apportés sont à considérer lors de l'établissement du plan de fumure.

Le fraisier est très sensible aux excès de salinité et il est sensible aux engrais chlorés. La potasse doit donc être apportée sous forme de sulfates.

Dans les sols ayant un pH neutre à alcalin, il faut utiliser des engrais acidifiants pour permettre une meilleure disponibilité des micro-éléments tels que le fer et le manganèse. Lorsque le pH du sol est supérieur à 7,5, il est conseillé d'effectuer des fertilisations foliaires pour les oligo-éléments problématiques (fer et manganèse).

Tableau 2. Fractionnement des apports de N dans les fraises.

	Fumure sur toute la surface (kg N/ha)	Fumure localisée sur la ligne (kg N/ha)
Deux à trois semaines après plantation en été	0–40	0–30
Lors de la reprise de la végétation au printemps	30–40	20–30
Floraison, au plus tard avant le paillage	30–40	20–30

## 5. Fertilisation des framboises, mûres, groseilles et des cultures alternatives d'arbustes à baies

### 5.1 Fertilisation azotée

La norme de fertilisation est indiquée en fonction du rendement estimé. Pour les cultures pluriannuelles, la norme est pondérée avec des indices de correction (tableaux 3 et 4). La somme de ces indices permet de déterminer la fertilisation azotée annuelle. Avec une application localisée sur la ligne, les quantités à épandre par hectare peuvent être réduites d'un tiers.

Pour les variétés d'automne, des apports modérés en N sont recommandés. Lors d'une fertilisation azotée trop importante, la formation des fleurs est retardée au profit de la phase végétative et la récolte est ainsi retardée.

Afin de réduire le risque de lessivage et d'optimiser l'efficacité du N, il est conseillé de fractionner les apports:

- 1<sup>er</sup> au départ de la végétation: 20 à 60 kg N/ha
- 2<sup>e</sup> à la floraison: 20 à 60 kg N/ha

La fertilisation azotée peut être pilotée à l'aide d'analyses  $N_{\min}$  au départ de la végétation et lors de la floraison. Si lors de l'analyse  $N_{\min}$  on obtient un résultat inférieur à 60 kg N/ha, il sera nécessaire d'appliquer un complément de fertilisation azotée (30 – 40 kg N/ha).

Lors d'apports réguliers de compost ou de fumier, les engrais azotés minéraux sont à limiter. Les framboises et les arbustes à baies sont aussi sensibles aux apports excessifs d'éléments fertilisants. Les conséquences se manifestent par des réductions de rendement avec des cannes aux entre-nœuds trop espacés, peu productives dans la partie basale, et des dégâts de pourriture grise.

La quantité de N à apporter dépend aussi de la variété. Pour les variétés avec une forte vigueur, des apports modérés sont recommandés. Pour des variétés à faible vigueur, des apports en N plus importants sont nécessaires pour obtenir des cannes d'une longueur suffisante.

Pour les cultures annuelles de framboises les normes restent les mêmes que pour les cultures pérennes (tableau 1), mais la distribution des apports change. Les cultures annuelles exigent une fertilisation azotée importante en été après la plantation, lorsque les cannes ou les tiges ont une forte croissance. Si lors de l'analyse  $N_{\min}$  on obtient un résultat inférieur à 60 kg N/ha, il sera nécessaire d'appliquer un complément de fertilisation azotée (30 – 40 kg N/ha). Par contre, les besoins en N sont moindres après la floraison, car les nouvelles pousses sont alors éliminées.

1. Apport à la plantation au printemps/été (20 à 40 kg N/ha)
2. Apport au départ de la végétation après l'hiver (20 à 40 kg N/ha)
3. Apport à la floraison (0 à 20 kg N/ha)

**Tableau 3. Pondération de la fertilisation azotée pour framboises et mûres. Chaque valeur correspond à 1 kg N/ha de réduction (–) ou d'augmentation (+) de la norme (Bertschinger et al. 2003; Ançay et al. 2012).**

Paramètre d'évaluation pour une réduction (–) ou une augmentation (+)	kg/ha		
Vigueur (longueur des tiges)	– 11 (excessive)	0 (normale)	+ 11 (faible)
Aoûtement	– 3 (tardif, gel d'hiver)	0 (normal)	+ 2 (faible)
Maladies et ravageurs (botrytis, dydimella, pucerons...)	– 2 (fréquents)		0 (rares)
Drageonnement	– 3 (fort)	0 (moyen)	+ 1 (faible)
Volume occupé par les cailloux	– 3 (faible, < 10 %)	0 (10–30 %)	+ 3 (élevé, > 30 %)
Teneur en matière organique MO	– 5 (très élevée)	0 (médiocre)	+ 5 (faible)
Entretien du sol	– 3 (sol nu)		+ 10 (sol enherbé)

**Tableau 4. Pondération de la fertilisation azotée pour groseilles, cassis, cultures alternatives d'arbustes à baies et myrtilles. Chaque valeur correspond à 1 kg N/ha de réduction (–) ou d'augmentation (+) de la norme (Bertschinger et al. 2003; Ançay et al. 2012).**

Paramètre d'évaluation pour une réduction (–) ou une augmentation (+)	kg/ha		
Vigueur (longueur des tiges)	– 15 (excessive)	0 (normale)	+ 15 (faible)
Chute des feuilles	– 4 (tardive, gel d'hiver)	0 (normal)	+ 3 (faible)
Volume occupé par les cailloux	– 3 (faible, < 10 %)	0 (10–30 %)	+ 3 (élevé, > 30 %)
Teneur en MO	– 5 (très élevée)	0 (médiocre)	+ 5 (faible)
Entretien du sol	– 3 (sol nu)		+ 3 (sol enherbé)
Production sur sciure, amendement organique, sciure, copeaux de bois			+ 30

## 5.2 Fertilisation phosphatée, potassique et magnésienne

Pour les éléments peu lessivables (P, K, Mg), les engrais du commerce sont à épandre au printemps, dès le départ de la végétation. Le framboisier étant sensible aux engrais chlorés, la potasse doit être apportée sous forme de sulfates. Dans les sols de pH neutre à alcalin, il est nécessaire d'utiliser des engrais acidifiants pour permettre une meilleure disponibilité des micro-éléments tels que le fer (Fe) et le manganèse (Mn). Lorsque le pH du sol est supérieur à 7,0, il faut effectuer des fertilisations foliaires complémentaires avec un chélate de fer et un chélate de manganèse.

## 6. Fertilisation des myrtilles

La fertilisation azotée des myrtilles peut être pondérée selon le tableau 4. Si la culture se fait sur un amendement organique, autre que la tourbe, la norme de fertilisation azotée peut être majorée de 20 à 30 unités pour garantir une croissance optimale.

Lorsque les myrtilliers sont cultivés dans du matériel organique non composté (copeaux, fibres de bois, sciure), un apport spécifique de N de 100 kg N/ha doit être fait l'année de la mise en place de l'amendement pour compenser l'immobilisation du N par les micro-organismes qui le décomposent.

Pour les cultures installées sur une couverture organique, la fertilisation est apportée sur toute la surface. Pour les systèmes «Frick», la fertilisation est localisée sur la ligne de plantation et il est conseillé de fractionner les apports de N (toutes les trois à quatre semaines), du début de la période de végétation à la mi-août.

Pour les cultures en pot ou lorsque l'irrigation se fait par goutte-à-goutte, les éléments fertilisants peuvent être apportés sous forme liquide par fertigation (figure. 2).

Le myrtillier est une plante acidophile, sensible à l'excès de calcaire, aux carences en potasse et aux déséquilibres en

oligo-éléments tels que le zinc ou le bore. Il faut utiliser des engrais qui ont une action acidifiante sur le sol, comme le sulfate d'ammonium, le sulfate de potasse, le sulfate de magnésium et des engrais phosphatés.

## 7. Fertilisation par goutte-à-goutte

L'irrigation fertilisante (fertigation) permet d'apporter aux plantes l'eau et les éléments nutritifs par le circuit d'irrigation goutte-à-goutte.

Elle peut contribuer à accroître le rendement et à améliorer la qualité des cultures de baies. Elle est indispensable pour les cultures sur buttes recouvertes de plastique noir.

L'irrigation fertilisante se fait à partir d'un réservoir de solution fertilisante concentrée (solution mère). Cette solution mère est composée d'engrais solubles dans l'eau afin d'éviter les précipités qui boucheraient l'installation d'irrigation. Les engrais contenant du calcium (Ca) sont à éviter, car ils précipitent facilement. La solution mère est distribuée sur la culture à l'aide d'une pompe doseuse. Une fois que la dose journalière ou hebdomadaire est passée dans le circuit, il faut continuer à irriguer à l'eau claire afin de rincer la canalisation.

Avec l'irrigation au goutte-à-goutte, une petite fraction du volume du sol reçoit de l'eau, c'est le bulbe d'arrosage. Les racines des plantes se concentrent dans cette portion humide. Il est donc important d'apporter à ce volume restreint tous les éléments fertilisants. Une irrigation fertilisante avec une fertilisation complète est donc un avantage pour la culture, car elle favorise la croissance des plantes et le rendement.

Lorsque le pH du sol est élevé (pH > 7,5), il est conseillé d'apporter le Fe et le Mn sous forme de chélate par des applications foliaires.

La quantité en éléments fertilisants appliquée par apport dépend de plusieurs facteurs: période de fertilisation, fertilité du sol et nombre d'apports prévu pour la culture (tableaux 5 et 6).



Figure 2. Myrtilles en bac: essai variétal à Agroscope Conthey (photo: Agroscope).

**Tableau 5. Fertigation de cultures annuelles de baies comme fraise et framboise avec goutte-à-goutte en plein champ: période de fertilisation, nombre (nb) d'apports et quantité d'éléments fertilisants par apport.**

Période de fertilisation	Année de plantation:	Deux semaines après la plantation jusqu'à mi-septembre
	Année de récolte:	Formation de nouvelles feuilles au printemps à mi-récolte
Nombre d'apports	Tous les jours à une fois par semaine	
Quantité d'éléments fertilisants par apport	<b>Fraise:</b>	
	Année plantation:	30 % Norme <sub>corr</sub> / nb d'apports prévus
	Année récolte:	70 % Norme <sub>corr</sub> / nb d'apports prévus
	<b>Framboise d'été:</b>	
	Année plantation:	40 % Norme <sub>corr</sub> / nb d'apports prévus
	Année récolte:	60 % Norme <sub>corr</sub> / nb d'apports prévus
	<b>Framboise remontante:</b>	
Plantation et récolte la même année:	100 % Norme <sub>corr</sub> /nb d'apports prévus	

Norme<sub>corr</sub> = norme de fumure corrigée en fonction de l'analyse de sol.

**Tableau 6. Fertigation de cultures pluriannuelles de baies comme framboise, mûre, groseille, myrtille et culture alternative d'arbustes à baies avec goutte-à-goutte en plein champ: période de fertilisation, nombre d'apports et quantité d'éléments fertilisants par apport.**

Période de fertilisation	Formation de nouvelles feuilles au printemps à fin récolte
Nombre d'apports	Tous les jours à une fois par semaine
Quantité d'éléments fertilisants par apport	Norme <sub>corr</sub> / nombre d'apports prévus

Norme<sub>corr</sub> = norme de fumure corrigée en fonction de l'analyse de sol.

## 8. Fraises, framboises et mûres sur substrat

### 8.1 Substrat

Le faible volume tampon et l'absence d'éléments nutritifs dans les substrats nécessitent l'apport régulier d'une solution nutritive équilibrée et adaptée aux besoins évolutifs des cultures. La gestion des apports ainsi que la composition minérale de la solution nutritive constituent des composantes capitales de la réussite des cultures sur substrat (figures 3 et 4).

### 8.2 Solution nutritive

La solution nutritive doit contenir des macroéléments (azote, phosphore, soufre, potassium, calcium, magnésium) ainsi que des micro-éléments (fer, manganèse, zinc, bore, cuivre, molybdène). Elle doit être préparée en tenant compte de la valeur nutritive de l'eau du réseau, car les apports minéraux de l'eau peuvent être importants et couvrir les besoins en sulfate, calcium et magnésium.

La composition minérale de l'eau du réseau est liée à son origine (source, nappe, lac). Elle peut varier passablement, même en cours de saison. Idéalement, la salinité de l'eau du réseau (électro-conductivité, EC) ne devrait pas dépasser 0,5 mS/cm. Si elle excède 1 mS/cm, on risque de



Figure 3. Les fraises sur substrat augmentent le rendement et facilitent la récolte (photo: Agroscope).



Figure 4. Les framboises sur substrat ont gagné en importance au cours des dernières années (photo: Agroscope).

rencontrer des problèmes d'accumulation de certains éléments favorisant ainsi des déséquilibres nutritifs, en particulier dans des systèmes fermés. Pour préparer les solutions nutritives, on peut soit travailler avec des engrais complets, soit avec des engrais simples. L'emploi d'engrais complets est particulièrement adapté pour les petites unités de production. Pour les plus grandes surfaces, l'emploi d'engrais simples se justifie car ils sont plus économiques. La composition optimale des éléments fertilisants pour fraisier, framboisiers et ronces est indiquée dans le tableau 7.

**Tableau 7. Composition optimale des éléments fertilisants dans la solution nutritive pour fraise, framboise et mûre (selon Lieten 1999; Guerineau 2003; Ançay et al. 2012).**

Période	Croissance végétative	Floraison à récolte
EC (mS/cm)	1,2 (0,8–1,6)	1,4 (0,8–1,8)
pH	5,8 (5,2–6,4)	5,8 (5,2–6,4)
Macro-éléments (mmol/l)		
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	1,0	0,0
K <sup>+</sup>	3,5	5,5
Ca <sup>2+</sup>	4,5	3,5
Mg <sup>2+</sup>	1,5	1,5
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10,5	11,0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1,5	1,5
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	1,5	1,5
Micro-éléments (µmol/l)		
Fe	15–20	15–20
Mn	15–20	15–20
Zn	7,5–10	7,5–10
B	8–12	8–12
Cu	0,7–1,0	0,7–1,0
Mo	0,3–0,5	0,3–0,5

EC = électro-conductivité.

### 8.3 Préparation de la solution nutritive à partir d'engrais complets

Au besoin, on pourra compléter la solution avec des éléments simples. La concentration de la solution mère est en général 100 fois plus élevée que celle de la solution nutritive.

Avec ce système, le dosage de la solution nutritive peut se faire simplement en utilisant une pompe doseuse (Dosatron).

En fonction de la qualité de l'eau du réseau et du type d'engrais utilisé, il sera nécessaire de travailler avec une deuxième pompe doseuse pour réguler le pH.

### 8.4 Préparation de la solution nutritive à partir d'engrais simples

La préparation de la solution nutritive se fait à partir d'engrais simples (tableau 8). Il faut calculer la quantité de chaque engrais à apporter pour fabriquer une solution mère équilibrée. La concentration des solutions mères est en général 100 à 200 fois plus élevée que celle des solutions nutritives. Elle est limitée par la solubilité des éléments qui la composent. Comme règle essentielle, on évite de mélanger des éléments contenant des sulfates ou des phosphates avec le Ca, pour éviter des précipitations; on prépare alors deux bacs de solutions mères afin de séparer les éléments incompatibles. Les acides peuvent être dilués dans un troisième bac afin de faciliter la gestion du pH. L'ajout des micro-éléments se fait dans le bac contenant les phosphates et les sulfates, l'ajout de fer dans celui contenant le Ca.

Pour ce système, le dosage de la solution nutritive se fait en utilisant trois pompes doseuses ou en utilisant une station de préparation et de pilotage de la solution nutritive (figure 5). Dans les deux cas, les pompes doseuses injectent l'engrais soit directement dans le réseau de fertigation, soit dans un bac de mélange dans lequel seront également injectées les eaux de recyclage du drainage pour le système fermé.

**Tableau 8. Préparation de la solution nutritive à partir d'engrais simples pour des systèmes ouverts.**

Engrais pour 100 litres de solution mère	Végétation			Floraison - fructification		
	Bac A	Bac B	Bac C	Bac A	Bac B	Bac C
Réglage de la pompe doseuse	0,8–1,2 %	0,8–1,2 %	0,5–1,5 % (qualité de l'eau)	0,8–1,2 %	0,8–1,2 %	0,5–1,5 % (qualité de l'eau)
Dihydrogénophosphate de potassium KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	2,0 kg			2,0 kg		
Sulfate de magnésium MgSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O	3,7 kg			3,7 kg		
Mélange d'oligo-éléments pour culture hors-sol	0,15 kg			0,15 kg		
Nitrate de potasse KNO <sub>3</sub>		2 kg			4,0 kg	
Nitrate de calcium 5(Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 2H <sub>2</sub> O) NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>		7,6 kg			5,4 kg	
Acide nitrique HNO <sub>3</sub> – 60 % (d = 1,37)			2 litres			2 litres



Figure 5. Automate pour la préparation de la solution nutritive adaptée pour les cultures de baies sur substrat (photo: Agroscope).

### 8.5 Apport de la solution nutritive

La durée et la fréquence des apports de solution nutritive doivent être adaptées en fonction des paramètres suivants:

- le volume et la rétention de l'eau du substrat
- le stade de développement des plantes
- les conditions climatiques (intensité lumineuse)

En général, il faut prévoir une irrigation fixe en début de matinée puis des irrigations déclenchées par le solarimètre. La dernière irrigation doit se faire avant 18h00 pour permettre au substrat de se ressuyer la nuit. Avec des goutteurs autorégulés, des irrigations d'une durée de deux à trois minutes en fonction du volume de substrat sont généralement suffisantes. Avec les substrats qui ont une plus faible rétention en eau que la tourbe, comme ceux à base de fibres de coco, il faudra prévoir des durées d'irrigation plus courtes, mais en augmenter la fréquence.

Le drainage quotidien doit se situer entre 10 et 15 % de l'apport pour une culture en système ouvert; il peut dépasser les 25 % avec un système fermé. Il faut contrôler régulièrement (au minimum deux à trois fois par semaine) les quantités d'eau apportées et le volume du drainage pour s'assurer que les consignes d'arrosage sont respectées et que l'installation fonctionne correctement. Lors de ces mesures, on contrôlera également l'EC et le pH (figure 6).

### 8.6 Adaptation de la solution nutritive

Les quantités d'eau et d'éléments nutritifs absorbés varient en fonction du type de variété, du stade de développement des plantes et de l'intensité lumineuse. Pour cette raison, les consignes de l'EC au goutteur doivent être adaptées durant la saison en fonction du type de variété et du développement de la plante (tableau 9). L'EC peut être augmentée de 0,2 par temps couvert et baissée dans les mêmes proportions par temps ensoleillé.

Pour corriger et adapter l'équilibre de la solution nutritive au besoin de la plante, des analyses régulières de la composition de la solution nutritive et du drainage sont indispensables. En général, les analyses se pratiquent toutes les cinq à six semaines en système ouvert et toutes les trois à quatre semaines en système fermé.



Figure 6. Contrôle des valeurs de pH et d'EC de la solution nutritive (photo: Agroscope).

La mesure de l'EC du drainage reflète l'intensité relative de l'absorption de l'eau et des éléments minéraux. Elle fournit la concentration totale en éléments minéraux mais ne donne pas d'information sur la composition. En période de fortes chaleurs, la plante consommera plus d'eau que d'éléments minéraux; en période de faible luminosité, le végétal absorbera relativement plus d'éléments minéraux. Afin de favoriser un bon développement végétatif, une production de fruits de qualité, et d'éviter des avortements de fleurs ou des brûlures de racines, l'EC du drainage doit être contrôlée régulièrement; elle ne doit pas dépasser 2 mS/cm. En cas de dépassement, il faudra irriguer durant une à deux journées à l'eau claire.

Tout écart de l'EC du drainage de plus de 20 % par rapport à l'EC de la solution nutritive apportée aux plantes nécessite un ajustement de l'EC de la solution de départ. Le pH du drainage peut varier de 5 à 7 sans conséquences sur le comportement des plantes.

Tableau 9. Modifier les consignes de l'EC et du pH à l'apport pour les baies en fonction du stade de croissance de la plante (selon Lieten 1999; Guerineau 2003; Ançay et al. 2012).

Stade	Variétés d'été (EC)	Variétés remontantes (EC)	Toutes les variétés (pH)
Démarrage	1,2	0,8 – 1,0	5,8
Floraison	1,6	1,2 – 1,4	5,8
Fructification	1,2	1,0 – 1,2	5,8

EC = électro-conductivité.

## 8.7 Système ouvert ou fermé

Le système ouvert permet l'apport d'une solution nutritive «neuve» à chaque irrigation. Les effluents doivent être récupérés et réutilisés pour d'autres cultures. Cette réutilisation nécessite de connaître la teneur du drainage en éléments fertilisants car ils doivent être intégrés dans le «Swiss Bilanz».

Le système fermé permet un recyclage dynamique des rejets sur la culture en place. Le recyclage complet réutilise les rejets du système, dont la composition varie en fonction de l'absorption des éléments nutritifs par la plante. Il peut en résulter une accumulation de certains éléments et des déséquilibres nutritifs, d'où la nécessité de pratiquer régulièrement (toutes les trois à quatre semaines) des analyses complètes afin de rééquilibrer la solution nutritive à apporter aux plantes. Globalement, le recyclage permet une économie importante en eau et engrais. Actuellement, les techniques de recyclage de la solution nutritive consistent essentiellement à adapter l'EC de la solution de mélange drainage-eau claire aux consignes données.

Dans les deux cas, il faudra prévoir un volume de stockage des solutions drainées adapté à la surface. On peut estimer le volume de drainage quotidien à environ 0,2 à 0,5 l/m<sup>2</sup>.

## 9. Bibliographie

- Ançay A., Carlen C. & Sigg P., 2012. Düngungsgrundlagen. In: Handbuch Beeren, Anonymus, Schweizer Obstverband (éd.), Zug, 149 p.
- Bertschinger L., Gysi C., Häseli A., Neuweiler R., Pfammatter W., Ryser J.-P., Schmid A. & Weibel F., 2003. Données de base pour la fumure en arboriculture fruitière. FAW fascicule 15, Wädenswil, 48 p.
- Guerineau C., 2003. La culture du fraisier sur substrat. Réalisation Ctifl et Cifref. Editions Ctifl, Paris, 165 p.
- Lieten P., 1999. Guidelines for nutrient solutions, peat substrate and leaf values of Elsanta strawbenies. Communication COST ACTION 836, Integrated Research in Berries, 2d meeting WG4, Nutrition and soilless culture, Versailles.
- Neuweiler R., Bertschinger L., Stamp P. & Feil B., 2003. The impact of ground cover management on soil nitrogen levels parameters of vegetative crop development, yield and fruits quality of strawberries. *European Journal of Horticultural Science* 86 (4), 189–191.
- Pivot D. & Gillioz J., 2000. Fraisier hors sol: alimentation minérale en solution recyclée. *Revue suisse de Vitic. Arboric. Hortic.* 32, (4), 207–210.
- Pivot D., Gilli C. & Carlen C., 2005. Données de base pour la fumure des cultures de légumes, de fleurs et de fraises sur substrat. *Revue suisse de Vitic., Arboric. et Hortic.* 34 (4), 3–8.



## 10. Liste des tableaux

Tableau 1. La norme de fertilisation est indiquée en fonction du rendement estimé. ....	14/4
Tableau 2. Fractionnement des apports de N dans les fraises.....	14/4
Tableau 3. Pondération de la fertilisation azotée pour framboises et mûres. Chaque valeur de correction correspond à 1 kg N/ha de réduction (-) ou d'augmentation (+) de la norme. ....	14/5
Tableau 4. Pondération de la fertilisation azotée pour groseilles, cassis, cultures alternatives d'arbustes à baies et myrtilles. Chaque valeur de correction correspond à 1 kg N/ha de réduction (-) ou d'augmentation (+) de la norme. ....	14/5
Tableau 5. Fertigation de cultures annuelles de baies comme fraise et framboise avec goutte-à-goutte en plein champ: période de fertilisation, nombre (nb) d'apports et quantité d'éléments fertilisants par apport. ....	14/7
Tableau 6. Fertigation de cultures pluriannuelles de baies comme framboise, mûre, groseille, myrtille et culture alternative d'arbustes à baies avec goutte-à-goutte en plein champ: période de fertilisation, nombre d'apports et quantité d'éléments fertilisants par apport. ....	14/7
Tableau 7. Composition optimale des éléments fertilisants dans la solution nutritive pour fraise, framboise et mûre. ....	14/8
Tableau 8. Préparation de la solution nutritive à partir d'engrais simples pour des systèmes ouverts. ....	14/8
Tableau 9. Modifier les consignes de l'EC et du pH à l'apport pour les baies en fonction du stade de croissance de la plante. ....	14/9

## 11. Liste des figures

Figure 1. Fraise, début de floraison. Les fraises sont les plus importantes cultures de baies en Suisse. ....	14/3
Figure 2. Myrtilles en bac: essai variétal à Agroscope Conthey.....	14/6
Figure 3. Les fraises sur substrat augmentent le rendement et facilitent la récolte. ....	14/7
Figure 4. Les framboises sur substrat ont gagné en importance au cours des dernières années. ....	14/7
Figure 5. Automate pour la préparation de la solution nutritive adaptée pour les cultures de baies sur substrat. ....	14/9
Figure 6. Contrôle des valeurs de pH et d'EC de la solution nutritive. ....	14/9





## 15/ Fertilisation des plantes aromatiques et médicinales

Christoph Carlen et Claude-Alain Carron  
Agroscope, 1964 Conthey, Suisse

Renseignements : [christoph.carlen@agroscope.admin.ch](mailto:christoph.carlen@agroscope.admin.ch)

## Table des matières

1. Introduction.....	15/3
2. Buts et principes d'une fertilisation raisonnée .....	15/3
3. Normes de fertilisation .....	15/3
4. Sols et exigences des plantes.....	15/7
5. Besoins et apports d'éléments nutritifs.....	15/7
5.1 P, K et Mg.....	15/7
5.2 N .....	15/7
6. Sources d'éléments nutritifs .....	15/7
6.1 N du sol .....	15/7
6.2 Résidus de récolte (P, K, Mg).....	15/8
6.3 Engrais de ferme, compost .....	15/8
6.4 Engrais du commerce .....	15/8
6.5 Fertilisation en agriculture biologique.....	15/8
6.6 Fertilisation et environnement .....	15/8
7. Bibliographie .....	15/9
8. Liste de tableaux .....	15/10
9. Liste des figures.....	15/10

## 1. Introduction

Ces principes de fertilisation des plantes aromatiques et médicinales (PAM) permettent aux vulgarisateurs et aux producteurs de pratiquer une fertilisation raisonnée, pour fournir à la plante une nutrition minérale équilibrée tout en respectant l'environnement. Ces normes de fertilisation ont été établies par Agroscope sur la base d'essais, d'analyses de prélèvements de plantes et de données de la littérature (Bomme et Nast 1998; Dachler et Pelzmann 1999; Marquard et Kroth 2002; Carlen *et al.* 2004; Carlen *et al.* 2006; Hoppe 2012; Hoppe 2013).

## 2. Buts et principes d'une fertilisation raisonnée

L'objectif d'une fertilisation raisonnée consiste à fournir à la plante une nutrition minérale équilibrée et adaptée pour obtenir une croissance optimale et une production de qualité, tout en maintenant la fertilité des sols et en respectant l'environnement. La fertilisation n'est pas le seul facteur intervenant dans la nutrition des plantes. Le sol, le climat et les pratiques culturales interagissent fortement avec les mécanismes d'absorption des différents minéraux. Avant toute réflexion sur les apports de fertilisants, il faut tenir compte des potentialités du site pour les plantes aromatiques et médicinales en considérant divers aspects comme la structure du sol, sa teneur en matière organique, le climat, les techniques culturales et la rotation des cultures.

La norme de fertilisation pour les éléments minéraux principaux tels que phosphore (P), potassium (K) et magnésium (Mg), correspond aux prélèvements des plantes, dans un site adapté et sur un sol normalement pourvu en nutriments et en eau. Elle peut être adaptée au rendement estimé et corrigée en fonction de l'état de fertilité du sol. Ces mesures permettent d'éviter des carences et des déséquilibres nutritionnels (antagonismes) préjudiciables à la culture.

En revanche, la norme pour la fertilisation azotée ne correspond en général pas aux prélèvements effectifs: elle se définit principalement en fonction de la minéralisation de l'azote (N) du sol d'un site dans des conditions pédo-climatiques moyennes. La norme de fertilisation azotée peut être adaptée proportionnellement au rendement estimé et au comportement végétatif de la plante. En fractionnant les apports de N, les pertes par lessivage sont nettement réduites.

## 3. Normes de fertilisation

Les normes de fertilisation des différentes plantes aromatiques et médicinales correspondent aux quantités nécessaires pour obtenir un rendement moyen de bonne qualité sur un sol considéré comme normalement pourvu. Pour le P, le K et le Mg, elles sont basées principalement sur les exportations par les récoltes (tableaux 1 et 2).



Figure 1. Mélisse: la variété Lorelei d'Agroscope en observation (photo: Agroscope).

Pour la fertilisation azotée, ces normes dépendent des prélèvements des plantes, de leur période de croissance et de la minéralisation du N organique du sol (celle-ci dépend du climat, de la teneur en matière organique du sol, du précédent cultural, du travail du sol, etc.). Pour les cultures pluriannuelles avec des récoltes successives durant toute la période de végétation (achillée, hysope, marrube, mélisse, menthe, monarde, origan, ortie, plantain, romarin, sarriette, sauge, thym, véronique, verveine) ou des cultures annuelles avec une longue durée de végétation (aneth, guimauve, livèche, marjolaine, mauve, pimprenelle), la norme est d'environ 20 % inférieure aux prélèvements de la plante en N, afin de tenir compte de la minéralisation du N du sol (figures 1, 2 et 3). Pour les cultures récoltées tôt dans la saison, comme l'edelweiss et le génépi, ou avant le début d'août, comme l'alchémille, l'arnica, le millepertuis ou la camomille, la norme de fertilisation azotée est réduite d'environ 10 % par rapport aux prélèvements (figure 4).

Pour le basilic, la norme de fertilisation azotée correspond au prélèvement afin de favoriser le rendement et la teneur en huile essentielle des feuilles (Marquard et Kroth 2002). Pour le fenouil, la norme de fertilisation azotée a été nettement réduite par rapport aux prélèvements afin de ne pas trop stimuler la croissance végétative au détriment de la formation des graines (Dachler et Pelzmann 1999).

Pour la primevère récoltée uniquement pour ses fleurs (0,5-0,7 t de fleurs/ha), la norme des principaux éléments fertilisants correspond à environ 50 % des prélèvements de la plante entière (figure 5). Pour le sureau, en revanche, la norme de fertilisation a été augmentée comparativement au prélèvement de récoltes similaires chez d'autres espèces fruitières (Kuster *et al.* 2017), afin d'assurer une bonne croissance de l'arbre.

Pour les exploitations qui ont relativement peu de surfaces de plantes aromatiques et médicinales, des normes simplifiées ont été définies par groupes d'espèces en fonction de leur rendement (tableau 3). Ces normes sont intégrées dans le «Suisse-Bilanz», un instrument de planification et de contrôle qui sert à analyser si les bilans de N et de P de l'exploitation sont équilibrés, conformément aux exigences écologiques définies dans l'ordonnance sur les paiements directs.

Tableau 1. Prélèvement en N, P, K et Mg des plantes aromatiques et médicinales (Carlen *et al.* 2006).

Culture	Rendement MS <sup>1</sup> (t/ha)	Prélèvement par la récolte (kg/ha)						
		N	P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K	K <sub>2</sub> O	Mg	
Achillée des collines	6,5	138	21	48	213	258	18	
Alchémille jaunâtre	5,0	84	15	34	104	126	16	
Aneth <sup>2</sup>	3,0	87	10	23	177	214	10	
Arnica <sup>2</sup>	fleurs <sup>2</sup>	0,4	10	2	5	10	12	2
	feuilles <sup>2</sup>	1,0	33	5	11	43	52	5
Basilic <sup>2</sup>	5,0	96	12	27	96	116	16	
Camomille matricaire	fleurs <sup>2</sup>	1,2	24	3	7	40	48	3
	feuilles <sup>2</sup>	3,0	34	7	16	37	45	4
Edelweiss	2,5	39	8	18	79	96	6	
Fenouil <sup>2</sup> commun	graines <sup>2</sup>	1,5	69	14	32	53	64	7
	feuilles <sup>2</sup>	3,0	59	10	23	144	174	15
Genépi blanc	1,5	32	8	18	32	39	6	
Guimauve officinale	racines	4,0	86	21	48	86	104	13
	feuilles	3,0	40	13	30	71	86	10
Hysope officinale	4,5	101	13	30	115	139	14	
Livèche	8,0	201	24	55	206	249	26	
Marjolaine cultivée <sup>2</sup>	3,5	96	13	30	98	119	9	
Marrube blanc	5,0	146	13	30	188	227	17	
Mauve verticillée	5,0	199	27	62	223	270	25	
Mélisse officinale	5,0	141	18	41	144	174	34	
Menthe orangée	5,5	110	20	46	165	200	12	
Menthe poivrée	5,5	135	24	55	223	270	15	
Millepertuis perforé <sup>2</sup>	4,0	105	17	39	99	120	10	
Monarde fistuleuse	4,5	74	13	30	109	132	14	
Origan	4,0	90	13	30	105	127	14	
Ortie dioïque	5,0	206	27	62	228	276	31	
Pimprenelle voyageuse	racines <sup>2</sup>	2,5	24	5	11	29	35	4
	feuilles <sup>2</sup>	3,5	113	23	53	176	213	14
Plantain lancéolé	5,0	168	17	39	208	252	22	
Primevère off. (plante entière) <sup>2</sup>	2,5	53	7	16	76	92	14	
<i>Rhodiola rosea</i> racines <sup>3</sup>	5,0	90	14	32	50	61	5	
Romarin	4,5	71	10	23	90	109	16	
Sarriette des jardins <sup>2</sup>	6,0	144	24	55	184	223	19	
Sauge officinale	5,0	147	15	34	164	198	15	
Sureau noir	0,6	24	3	7	15	18	5	
Thym vulgaire	4,0	68	9	21	87	105	9	
Véronique officinale	2,0	42	7	16	55	67	8	
Verveine officinale, odorante	4,0	110	15	34	98	119	14	

<sup>1</sup> MS = matière sèche; pour les espèces pluriannuelles, les rendements considérés sont ceux de la 2<sup>e</sup> année de culture.

<sup>2</sup> Prélèvement selon Bomme et Nast (1998).

<sup>3</sup> Prélèvement des racines de *Rhodiola rosea* après quatre années de culture selon Ampong-Nyarko (2014).

Tableau 2. Norme de fertilisation pour des plantes aromatiques et médicinales (Carlen *et al.* 2006).

Culture	Rendement MS <sup>1</sup> (t/ha)	Norme de fertilisation (kg/ha)					
		N	P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K	K <sub>2</sub> O	Mg
Achillée des collines	6,5	100	20	46	190	230	20
Alchémille jaunâtre	5,0	70	15	34	100	121	15
Aneth	3,0	80	15	34	160	194	10
Arnica fleurs	0,4	30	10	23	50	61	5
Basilic	5,0	100	15	34	100	121	15
Camomille fleurs	1,2	50	10	23	70	85	5
Edelweiss	2,5	40	10	23	75	91	5
Fenouil graines	1,5	80	25	57	150	182	20
Genépi blanc	1,5	30	10	23	35	42	5
Guimauve racines	4,0	100	35	80	150	182	20
Hysope officinale	4,5	80	15	34	110	133	15
Livèche	8,0	150	25	57	190	230	25
Marjolaine cultivée	3,5	80	15	34	100	121	10
Marrube blanc	5,0	120	15	34	180	218	20
Mauve verticillée	5,0	150	25	57	200	242	25
Mélisse officinale	5,0	110	20	46	140	169	30
Menthe orangée	5,5	90	20	46	150	182	15
Menthe poivrée	5,5	110	25	57	200	242	15
Millepertuis perforé	4,0	90	15	34	100	121	10
Monarde fistuleuse	4,5	65	15	34	100	121	15
Origan	4,0	80	15	34	100	121	15
Ortie dioïque	5,0	150	25	57	200	242	30
Pimprenelle racines	2,5	110	30	69	190	230	20
Plantain lancéolé	5,0	120	15	34	200	242	20
Primevère off. (plante entière)	2,5	30	5	11	50	61	10
<i>Rhodiola rosea</i> <sup>2</sup> racines	5,0	40	10	23	60	73	10
Romarin	4,5	60	10	23	90	109	15
Sarriette des jardins	6,0	110	25	57	180	218	20
Sauge officinale	5,0	120	15	34	150	182	15
Sureau noir	0,6	60	10	23	50	61	10
Thym vulgaire, serpolet	4,0	60	10	23	85	103	10
Véronique officinale	2,0	40	10	23	55	67	10
Verveine officinale, odorante	4,0	90	15	34	100	121	15

<sup>1</sup> MS = matière sèche; pour les espèces pluriannuelles, les rendements considérés sont ceux de la 2<sup>e</sup> année de culture.

<sup>2</sup> Norme de fertilisation pour *Rhodiola rosea* adaptée selon Buchwald *et al.* (2015).

**Tableau 3. Normes de fertilisation en N, P, K et Mg pour des groupes des plantes aromatiques et médicinales en fonction du rendement (Carlen *et al.* 2006).**

Groupes d'espèces en fonction du rendement (t MF <sup>1</sup> /ha)		Rendement MS <sup>2</sup> (t/ha)	Norme de fertilisation (kg/ha)					
			N	P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K	K <sub>2</sub> O	Mg
Petit	5 t	0,8	40	10	23	50	61	10
Moyen	15 t	2,5	70	15	34	130	157	15
Gros	35 t	5,0	120	20	46	160	194	20
Très gros	50 t	7,5	160	25	57	200	242	25

<sup>1</sup> MF = matière fraîche.    <sup>2</sup> MS = matière sèche.



Figure 2. Thym : La variété Varico 3 d'Agroscope est riche en huile essentielle avec une haute teneur en thymol (photo: Valplantes).



Figure 3. Sauge: une plante médicinale et aromatique importante en Suisse (photo: Valplantes).



Figure 4. Alchémille: la variété d'Agroscope est bien adaptée à la zone de montagne (photo: Agroscope).



Figure 5. Primevère: comparaison de diverses provenances (photo: Agroscope).



## 4. Sols et exigences des plantes

Le choix du lieu de culture des plantes aromatiques et médicinales requiert une bonne connaissance des exigences pédo-climatiques de chacune d'elles. Les exigences liées au sol diffèrent selon les espèces: le thym préfère les conditions plutôt sèches et la menthe les conditions plutôt humides. L'arnica affectionne les sols acides et le genépi les sols légers et maigres. Bien connaître le sol et les conditions climatiques du lieu de culture permet de faire un premier choix parmi les espèces pour s'assurer une production qualitativement et quantitativement satisfaisante.

## 5. Besoins et apports d'éléments nutritifs

### 5.1 P, K et Mg

La norme de fertilisation pour ces éléments correspond à la quantité de chaque élément qu'il faut apporter dans un sol dont l'état de fertilité est satisfaisant. Le niveau de rendement des cultures pris en compte pour la définition de la norme est atteint dans la plupart des exploitations. Toutefois, lorsque, dans certaines régions ou parcelles (zones limites pour les PAM, sol superficiel, pas d'irrigation, etc.), les rendements sont régulièrement inférieurs, les normes doivent être réduites de manière proportionnelle. À l'inverse, pour des rendements systématiquement plus élevés, les normes sont renforcées proportionnellement: par exemple, pour 10% de rendement en plus, la norme est majorée de 10%. Lorsqu'il s'agit de différences occasionnelles, il n'est pas nécessaire de les prendre en compte. Pour les cultures pluriannuelles en première année avec mise en place des plantes, la norme de fertilisation doit être réduite en fonction du rendement estimé. Ces adaptations en fonction du rendement peuvent être corrigées selon l'état de fertilité du sol. L'objectif de la fertilisation en P, K et Mg est d'atteindre un niveau de fertilité du sol satisfaisant à long terme.

Il est possible d'apporter le phosphore en une fois pour trois à quatre ans, en particulier lorsque les quantités nécessaires sont faibles ou lorsque les apports sont effectués sous forme organique comme du fumier ou du compost. L'application du potassium et du magnésium se fait de préférence au printemps avant le début de végétation.

### 5.2 N

L'azote est un élément qui influence fortement la vigueur des plantes aromatiques et médicinales. Le manque de N réduit principalement la vigueur et la production des cultures. L'excès de N engendre surtout un problème environnemental par le lessivage important de cet élément et peut augmenter la sensibilité de la plante aux maladies et ravageurs. La norme azotée doit être corrigée selon le rendement estimé, de la même façon que pour P, K et Mg.

En cas de forts besoins en N, l'apport doit impérativement être fractionné à cause du risque de lessivage, ce qui permet en outre d'améliorer son efficacité. Chaque apport ne doit pas dépasser 60 kg N/ha. Les épandages peuvent avoir lieu au printemps au départ de la végétation et après la première coupe en mai/juin; un troisième apport peut être prévu pour les cultures qui ont des besoins élevés en N.

## 6. Sources d'éléments nutritifs

### 6.1 N du sol

D'un point de vue agronomique, la fourniture d'éléments nutritifs par le sol est surtout importante pour le N. La mise à disposition du N pour les plantes par le sol dépend fortement du potentiel de minéralisation de la parcelle. Les principaux facteurs qui influencent la minéralisation sont la teneur en matière organique du sol, le précédent cultural et le travail du sol (tableau 4).

**Tableau 4. Arrière-effet azoté lié au retournement de prairie, d'engrais verts et au travail du sol (ces valeurs sont sujettes à d'importantes fluctuations liées au site et aux conditions météorologiques) (adapté selon Neuweiler et al. 2006).**

Source de N		Arrière-effet azoté (kg/ha)	
Prairies (chaumes, après la fauche)	prairies naturelles ou temporaires (trois ans et plus)	10–30	
	prairies temporaires de deux ans	0–10	
	prairies temporaires d'un an	0	
Engrais verts	légumineuses, phacélie, colza, chou de Chine	30	
	seigle, tournesol	20	
	avoine, graminées	10	
Fourniture de N par la matière organique (MO) du sol: par travail du sol ou sarclage à partir du mois de mai (juin en zone de montagne), à condition que l'humidité et la structure du sol soient optimales		< 5 % de MO	15
		5–12 % de MO	20
		< 12 % de MO	25

## 6.2 Résidus de récolte (P, K, Mg)

Pour planifier la fertilisation d'une culture, les résidus éventuels en P, K et Mg de la culture précédente doivent être pris en compte. Seules quelques cultures de plantes aromatiques et médicinales laissent des résidus de récolte (tableau 5). Les autres cultures ne donnent pas ou que très peu de résidus de récolte.

## 6.5 Fertilisation en agriculture biologique

En principe, toutes les recommandations de ce document sont applicables à la culture biologique. Quelques particularités peuvent être relevées cependant dans l'utilisation des engrais en culture biologique. Le principe de base des cultures biologiques consiste à exploiter le sol avec ménagement et à y maintenir une activité biologique élevée. La

**Tableau 5. Restitution en P, K et Mg des résidus de récolte. Les cultures de plantes aromatiques et médicinales non mentionnées dans ce tableau ne donnent pas ou que très peu de résidus de récolte (Carlen et al. 2006).**

Culture	Résidus de récolte (t/ha)	Résidus de récolte (kg/ha)				
		P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K	K <sub>2</sub> O	Mg
Arnica feuilles*	1,0	5	11	43	52	5
Camomille feuilles*	3,5	23	53	176	213	14
Fenouil feuilles*	3,0	13	30	71	86	10
Guimauve feuilles	2,5	10	23	144	174	15
Pimprenelle feuilles*	3,0	7	16	37	45	4

\* Selon Bomme et Nast (1998).

## 6.3 Engrais de ferme, compost

Dans la plupart des cas, les engrais de ferme de l'exploitation (purin et fumier) permettent de couvrir une bonne partie des besoins des cultures. L'efficacité et la gestion économique de la fertilisation imposent que toutes les exploitations qui ont du bétail utilisent judicieusement leurs engrais de ferme. Des valeurs indicatives sur leurs teneurs en éléments fertilisants peuvent aider l'agriculteur à apprécier quantitativement et qualitativement les engrais de ferme. En culture de plantes aromatiques et médicinales, le compost, le fumier, le purin ou le lisier sont utilisés uniquement avant la plantation pour des raisons d'hygiène alimentaire.

## 6.4 Engrais du commerce

En Suisse, la majorité des plantes médicinales et aromatiques sont cultivées selon les directives de l'agriculture biologique. Les engrais du commerce autorisés dans ce système de production figurent sur la «Liste des intrants» éditée chaque année par l'Institut de recherche de l'agriculture biologique (FiBL). Les engrais organiques azotés sont importants pour la réussite des cultures (Carlen et al. 2004).

stimulation de la vie du sol, responsable de la transformation de N, doit résulter de l'augmentation de la part des légumineuses dans la rotation et de l'utilisation ciblée de compost et d'engrais de ferme. Par rapport à un labour, l'incorporation superficielle des engrais de ferme et des déchets de récolte favorise la minéralisation du N et augmente son utilisation par la plante. Les directives spécifiques en matière de fertilisation en agriculture biologique figurent dans les différents cahiers des charges.

## 6.6 Fertilisation et environnement

Une fertilisation respectueuse de l'environnement garantit le maintien à long terme de la fertilité du sol, maîtrise les pertes évitables d'éléments fertilisants et contribue à ne pas charger les eaux de surface et la nappe phréatique. Pour maintenir la fertilité du sol à long terme et réduire les charges sur l'environnement, le cycle des éléments nutritifs doit être fermé à l'échelle de l'exploitation, et ainsi le bilan équilibré. Il est conseillé d'appliquer des engrais après avoir contrôlé la fertilité du sol par une analyse de terre. Lorsqu'un apport est nécessaire, il faut tenir compte des besoins spécifiques et momentanés de la plante afin que ces éléments puissent être absorbés.

Il incombe à tous les agriculteurs d'arriver à programmer la fertilisation de leur domaine en fonction de ces données de base, de leur expérience et avec l'aide de la vulgarisation, pour que la fertilisation soit appliquée au bon moment et qu'elle corresponde aux besoins des plantes.

## 7. Bibliographie

- Ampong-Nyarko K., 2014. *Rhodiola rosea* Cultivation in Canada and Alaska, In: *Rhodiola rosea* (éd. Cuerrier A. & Ampong-Nyarko K.). CRC Press, Boca Raton, London, New York, 125–153.
- Bomme U. & Nast D., 1998. Nährstoffentzug und ordnungsgemässe Düngung im Feldbau von Heil- und Gewürzpflanzen. *Zeitschrift für Arznei- und Gewürzpflanzen* 3, 82–90.
- Buchwald W., Mordalski R., Kucharski W. A., Gryszczynska A. & Adamczak A., 2015. Effect of fertilization on rose-root (*Rhodiola rosea* L.) yield and content of active compounds. *Acta Scientiarum Polonorum. Hortorum Cultus* 14 (2), 109–121.
- Carlen C., Carron C.-A. & Amsler P., 2006. Données de base pour la fumure des plantes aromatiques et médicinales. *Revue suisse de Viticulture, Arboriculture, Horticulture* 38 (6), I–VIII.
- Carlen C., Carron C.-A. & Rey C., 2004. La fertilisation en culture biologique: normes et choix des engrais. Actes du 5e colloque Mediplant, Evolène, 25–27 septembre 2003, 63–67.
- Dachler M. & Pelzmann H., 1999. *Arznei- und Gewürzpflanzen*. Österreichischer Agrarverlag, Klosterneuburg. 353 p.
- Hoppe B. (éd.), 2012. *Handbuch des Arznei- und Gewürzpflanzenbaus*, Band 4: Arznei- und Gewürzpflanzen A-K. Verein für Arznei- und Gewürzpflanzen Saluplanta e.V. Bernburg. 800 p.
- Hoppe B. (éd.), 2013. *Handbuch des Arznei- und Gewürzpflanzenbaus*, Band 5: Arznei- und Gewürzpflanzen L-Z. Verein für Arznei- und Gewürzpflanzen Saluplanta e.V. Bernburg. 800 p.
- Kuster Th., Eicher O., Leumann L., Müller U., Poulet J. & Rutishauser R., 2017. 13/ Fertilisation en arboriculture. In: *Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF 2017)* (Ed. S. Sinaj & W. Richner). *Recherche Agronomique Suisse* 8 (6), publication spéciale, 13/1–13/20.
- Marquard R. & Kroth E., 2002. *Anbau und Qualitätsanforderungen ausgewählter Arzneipflanzen II*. Buchedition Agrimedia GmbH. Bergen/Dumme. 191 p.
- Neuweiler R., Gilli C., Freund M., Koch W., Wigger A., Koller M. & Moos D., 2006. *Düngung*. *Handbuch Gemüse*. Verband Schweizerischer Gemüseproduzenten, Berne, 71–96.

## 8. Liste des tableaux

Tableau 1. Prélèvement en N, P, K et Mg des plantes aromatiques et médicinales. ....	15/4
Tableau 2. Norme de fertilisation pour des plantes aromatiques et médicinales. ....	15/5
Tableau 3. Normes de fertilisation en N, P, K et Mg pour des groupes des plantes aromatiques et médicinales en fonction du rendement. ....	15/6
Tableau 4. Arrière-effet azoté lié au retournement de prairie, d'engrais verts et au travail du sol (ces valeurs sont sujettes à d'importantes fluctuations liées au site et aux conditions météorologiques). ....	15/7
Tableau 5. Restitution en P, K et Mg des résidus de récolte. Les cultures de plantes aromatiques et médicinales non mentionnées dans ce tableau ne donnent pas ou que très peu de résidus de récolte. ....	15/8

## 9. Liste des figures

Figure 1. Mélisse: la variété Lorelei d'Agroscope en observation. ....	15/3
Figure 2. Thym: La variété Varico 3 d'Agroscope est riche en huile essentielle avec une haute teneur en thymol. ....	15/6
Figure 3. Sauge: une plante médicinale et aromatique importante en Suisse. ....	15/6
Figure 4. Alchémille: la variété d'Agroscope est bien adaptée à la zone de montagne. ....	15/6
Figure 5. Primevère: comparaison de diverses provenances. ....	15/6



## 16/ Fertilisation des plantes ornementales et des arbustes

Christoph Carlen<sup>1</sup>, Céline Gilli<sup>1</sup>, Josef Poffet<sup>2</sup> et Hans Peter Wegmüller<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Agroscope, 1964 Conthey, Suisse

<sup>2</sup> Jardin Suisse, 5000 Aarau, Suisse

<sup>3</sup> Engrais Hauert HBG SA, 3257 Grossaffoltern, Suisse

Renseignements: [christoph.carlen@agroscope.admin.ch](mailto:christoph.carlen@agroscope.admin.ch)

## Table des matières

1. Introduction .....	16/3
2. Fertilisation des plantes en pot et en container .....	16/3
3. Fleurs coupées sur substrat en serre .....	16/7
4. Fertilisation des fleurs coupées en pleine terre .....	16/7
5. Conifères et arbustes en pépinière de pleine terre .....	16/9
6. Bibliographie .....	16/10
7. Liste des tableaux .....	16/11
8. Liste des figures .....	16/11

## 1. Introduction

Ces principes de fertilisation visent à définir des lignes directrices pour une fertilisation durable des plantes et arbustes d'ornement en culture commerciale. Un apport suffisant en éléments nutritifs est une condition préalable pour une croissance harmonieuse, pour des plantes saines et de haute qualité. Ces principes serviront de base pour les exigences de SwissGap Horticulture dans le domaine de la fertilisation. Ils ont été établis en considérant la littérature ancienne et récente. En particulier, les normes de fertilisation ont été définies sur la base des quantités prélevées par les cultures (Wegmüller et Gysi 1993; Jentzsch et Thalk 2007; Röber et Schacht 2008; Wartenberg 2008; Wegmüller *et al.* 2012). Les multiples possibilités d'apporter les éléments nutritifs et de les mettre à disposition des plantes et arbres d'ornement ont été peu abordées jusqu'ici.

Les termes «plantes ornementales» et «arbustes d'ornement» comprennent diverses espèces, aussi bien cultivées en sol que sur substrats et organiques ou minéraux, ou encore en hydroponie. Les plantes ornementales et arbustes d'ornement cultivés commercialement sont divisés en quatre groupes, en fonction de leurs exigences nutritives et des systèmes de fertilisation – parmi lesquels l'hydroponie n'est pas considérée: a) plantes en pot et en container; b) fleurs coupées sur substrat en serre; c) fleurs coupées en pleine terre; d) conifères et arbustes en pépinières de pleine terre.

## 2. Fertilisation des plantes en pot et en container

Les cultures en pot et en container sont indépendantes du sol. Les plantes grandissent dans des pots, des containers ou d'autres contenants (figures 1, 2 et 3). Un surdosage ou un sous-dosage d'engrais dans un espace confiné peut entraîner des problèmes de croissance et de floraison. La fertilisation des cultures en pot et en container est donc très exigeante (tableaux 1 et 2). Elle se base principalement sur l'azote (N), notamment parce que cet élément présente la plage optimale la plus restreinte et qu'un apport inadéquat compromet rapidement le succès de la culture (Scharpf 1989; Wartenberg 2008). L'apport en autres macro-éléments tels que phosphore (P), potassium (K) et magnésium (Mg) est ensuite déterminé pour conserver un certain équilibre par rapport à l'azote.

Le tableau 1 répertorie les besoins en N des principales plantes en pot cultivées en Suisse et les besoins en P, K et Mg qui en dérivent. Le rapport N:P est de 1,0:0,2. Les rapports de N:K varient en fonction de l'espèce entre 1,0:0,6 et 1,0:1,5, et ceux de N:Mg entre 1,0:0,10 et 1,0:0,15. Wartenberg (2008) a compilé, à partir de la littérature, les lignes directrices pour la fertilisation des plantes en pot. Quelques 200 espèces ont été ainsi prises en compte et les données sont publiées sous [www.publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/14187](http://www.publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/14187).



Figure 1. Primevères (*Primula acaulis*) cultivées en pot (photo: Agroscope).



Figure 2. L'étoile de Noël, une plante en pot importante (*Poinsettia*, *Euphorbia pulcherrima*) (photo: Agroscope).



Figure 3. *Calluna* (*Calluna vulgaris*) cultivée en pot (photo: Agroscope).

**Tableau 1. Normes fertilisation pour les principales espèces de plantes en pot (Röber et Schacht 2008; Wartenburg 2008; Wegmüller et al. 2012). N est l'élément principal et les autres macro-éléments P, K et Mg sont équilibrés par rapport à N.**

Espèce, groupe	Taille de la plante ou du pot	Besoins en N (g N par plante)	Equilibre N:P:K:Mg (N:P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> :K <sub>2</sub> O:Mg)
Chrysanthème	Petites plantes	0,2–0,3	1,0:0,2:1,5:0,15 (1,0:0,45:1,8:0,15)
	Plantes moyennes	0,3–0,4	
	Grosses plantes	0,4–0,5	
Primevère	Pot de 10 cm	0,2–0,3	1,0:0,2:1,25:0,15 (1,0:0,45:1,5:0,15)
Saintpaulia	Petites plantes	0,05–0,08	
	Grosses plantes	0,1–0,2	
Fuchsia	Pot de 11 cm	0,3–0,4	1,0:0,2:1,0:0,15 (1,0:0,45:1,2:0,15)
Pétunia	Pot de 10 cm	0,3–0,4	
Hortensia	Pot de 11 cm	0,5	
Impatience de Nouvelle-Guinée	Variétés moyennes	0,3–0,4	
Kalanchoé	Pot de 11 cm	0,4	
Viola	Pot de 9-10 cm	0,15–0,2	
Cyclamen <sup>1</sup>	Mini plantes	0,15–0,25	
	Plantes normales	0,45–0,6	
	Grosses plantes	0,7–0,8	
Begonia elatior	Petites plantes	0,2–0,3	
	Grosses plantes	0,4–0,6	
Pelargonium	Plantons	0,3–0,4	
	Petites plantes	0,3–0,4	
	Plantes moyennes	0,4–0,5	
	Grosses plantes	0,5–0,7	
Poinsettia	Petit unitige	0,2	
	Petit multitige	0,4–0,5	
	Mutitige moyen	0,6–0,7	
	Gros multitige	0,8–1,0	
	Sur tige	3,0–5,0	
Azalée	Pot de 11 cm	0,5	1,0:0,2:0,7:0,10 (1,0:0,45:0,85:0,15)
Calluna	Pot de 12 cm	0,5–0,6	
Erica	Pot de 11 cm	0,5	
Rosier	Pot de 10 cm	0,2	

<sup>1</sup> Dernier tiers de culture pour les cyclamens N:P:K:Mg = 1,0:0,2:1,0:0,15.

Il est opportun de fractionner la fertilisation de ces plantes en une fertilisation de base et une fertilisation complémentaire; la première couvre l'équilibre de base en nutriments avec des engrais solubles pour un substrat (tableau 3), tandis que la seconde complète les quantités d'éléments nutritifs prélevés par une espèce au cours de la période de culture. La fertilisation complémentaire peut être mélangée au substrat comme fumure de fond lors de la préparation avec des engrais à libération contrôlée, ou apportée de façon localisée lors du rempotage. Les engrais à libération contrôlée, souvent utilisés, fournissent des éléments fertilisants pour une période qui couvre une grande partie, voire la durée totale de la culture (Wartenburg 2008; Wegmüller et al. 2012). La fertilisation complémentaire est généralement apportée avec un engrais liquide (surtout par fertigation), une fois par semaine ou à intervalles plus longs. Dans ce cas, l'eau d'irrigation est en-

richie avec des engrais hydrosolubles. La sensibilité au sel des différentes cultures doit être considérée (tableau 4).

Une autre technique de fertilisation est la fertigation en utilisant des systèmes fermés (par flux et reflux, sur des nattes, avec gouttières, goutte à goutte). La fertigation est d'une grande importance. A chaque arrosage, les éléments nutritifs sont apportés à l'eau d'irrigation, à la concentration souhaitée, au moyen de solutions mères, du drainage, de système de pompe et de mélangeur, afin de permettre une croissance optimale des plantes. La technique est identique à celle utilisée en cultures de baies sur substrat (Carlen et al. 2016). La mesure du pH et de l'électroconductivité (EC en mS/cm) de la solution nutritive sont des méthodes de contrôle établies. Les valeurs optimales varient entre 5,6 et 6,2 pour le pH et entre 0,5 et 2,5 mS/cm pour l'EC (tableaux 4 et 5).



**Tableau 2. Normes de fertilisation pour arbres en container. N est l'élément principal; l'apport des autres macro-éléments P, K et Mg se fait selon un équilibre par rapport à N<sup>1</sup>.**

Espèce	Besoins en N	Espèce	Besoins en N
<i>Abies nordmanniana</i> <i>Cotoneaster dammeri</i> <i>Deutzia rosea</i> , faible vigueur <i>Pachysandra terminalis</i> <i>Pinus cembra</i> <i>Pinus mugo</i> «Mughus» <i>Pinus wallichiana</i> <i>Potentilla fruticosa</i> <i>Prunus cerasifera</i> <i>Rhododendron repens</i> <i>Ribes sanguineum</i> <i>Salix repens</i> <i>Skimmia japonica</i>	faibles 0,3–0,45 kg/m <sup>3</sup> ou g/l	<i>Juniperus communis</i> «Hibernica» <i>Juniperus squamata</i> «Meyeri» <i>Kolkwitzia amabilis</i> <i>Lonicera pileata</i> <i>Mahonia aquifolium</i> <i>Malus hybrides</i> <i>Pinus nigra</i> «Austriaca» <i>Prunus laurocerasus</i> <i>Pyracantha coccinea</i> <i>Spiraea bumalda</i> <i>Spiraea japonica</i> <i>Taxus baccata</i> <i>Thuja occidentalis</i> <i>Viburnum burkwoodii</i> <i>Viburnum plicatum</i>	moyens 0,45–0,6 kg/m <sup>3</sup> ou g/l
<i>Acer saccharinum</i> <i>Amelanchier canadensis</i> <i>Amelanchier laevis</i> <i>Berberis canadensis</i> <i>Berberis thunbergii</i> <i>Buddleja davidii</i> <i>Buxus sempervirens</i> <i>Callicarpa bodinieri</i> <i>Cedrus deodara</i> <i>Cotoneaster adpressus</i> <i>Cytisus scoparius</i> <i>Deutzia gracilis</i> <i>Deutzia rosea</i> <i>Euonymus alatus</i> <i>Euonymus fortunei</i> «Vegetus» <i>Exochorda racemosa</i> <i>Genista tinctoria</i> <i>Hibiscus syriacus</i> <i>Hypericum calycinum</i> <i>Hypericum patulum</i>	moyens 0,45–0,6 kg/m <sup>3</sup> ou g/l	<i>Chamaecyparis lawsoniana</i> <i>Cotoneaster multiflorus</i> <i>Forsythia x intermedia</i> <i>Hydrangea paniculata</i> <i>Ilex aquifolium</i> <i>Juniperus chinensis</i> <i>Kerria japonica</i> <i>Ligustrum ovalifolium</i> <i>Viburnum rhytidophyllum</i> <i>Weigelia hybrides</i>	élevés 0,6–0,75 kg/m <sup>3</sup> ou g/l

<sup>1</sup> N:P:K:Mg = 1,0:0,15:0,6:0,1 ou N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O:Mg = 1,0:0,34:0,73:0,1; Wegmüller et al. 2012

Pour contrôler l'apport des éléments nutritifs dans le substrat et pour déterminer le pH et l'EC, la méthode suivante est recommandée.

1. Dans un récipient, faire une marque à 200 ml et une autre à 300 ml.
2. Remplir avec 200 ml d'eau déminéralisée.
3. Compléter jusqu'à 300 ml avec du substrat (échantillon représentatif, bien humide)
4. Agiter environ une minute (figure 4).
5. Le pH et l'EC peuvent ensuite être mesurés dans cette suspension.

Ces résultats sont comparables à des mesures de laboratoire selon la méthode d'extraction en volume habituellement utilisée en Suisse. Ils peuvent être interprétés directement avec les données du tableau 4 concernant la plage optimale de l'EC dans les substrats. En particulier, pour des valeurs faibles, une correction peut être facilement apportée en augmentant la fertilisation complémentaire. Si le résultat se situe dans la fourchette ou au-dessus, et que des troubles nutritifs sont quand même soupçonnés, une analyse en laboratoire aide à déterminer les éléments nutritifs déficients. Le tableau 5 décrit un exemple de la composition minérale d'une solution nutritive pour les plantes



Figure 4. Dans un récipient, faire une marque à 200 ml et une à 300 ml pour déterminer le pH et l'EC d'un substrat (photo: Josef Poffet, Jardin Suisse).

**Tableau 3. Eléments fertilisants solubles dans l'eau par litre de substrat selon la méthode d'extraction en volume 1:1,5. Le niveau de base correspond au niveau de conservation pendant la durée de culture (Gysi et al. 1995; Wegmüller et al. 2012).**

Groupe	Niveau de base en éléments fertilisants solubles (mg/l de substrat) (se réfère à chaque élément)			
	N	P <sup>1</sup>	K	Mg
Cultures sensibles aux nutriments (semis)	60	10	85	15
Besoins moyens en nutriments	120	20	180	30
Besoins élevés en nutriments	220	40	275	60

<sup>1</sup> La solubilité dans l'eau du P dépend fortement du pH. Avec un pH supérieur à 6,5, la quantité de P soluble dans l'eau n'est pas atteinte; la réserve en P selon la méthode de l'acétate d'ammonium EDTA doit également être considérée pour l'évaluation.

**Tableau 4. Tolérance à la salinité, ajustement de l'électro-conductivité (EC) de la solution nutritive pour une fertilisation liquide (fertilisation complémentaire ou fertigation) et plage optimale dans le substrat pour diverses espèces de plantes selon Wegmüller et al. (2012).**

Tolérance à la salinité	Culture	Plage optimale de l'EC dans l'eau d'irrigation (mS/cm)	Plage optimale de l'EC dans le substrat (mS/cm)
Très sensible	Orchidées, Broméliacées Fougères Multiplication: Erica, Calluna, Azalées Semis en général	0,5–1,0	0,4–0,6
Sensible	Azalées Calluna, Erica Jeunes plantes en général	1,0–1,5	0,6–0,8
Peu sensible	Begonia Cyclamen Poinsettia Rosier	1,5–2,0	0,8–1,2
Tolérante	Chrysanthèmes Pélargonium	2,0–2,5	1,3–1,8

**Tableau 5. Compositions des solutions nutritives pour les plantes en pot et fleurs coupées sur substrat organique en système fermé (SF) et en système ouvert (SO) selon Pivot et al. (2005).**

Système	Plantes en pot	Alstromeria		Anthurium		Oeillet		Gerbera		Rosier	
	SF	SO	SF	SO	SF	SO	SF	SO	SF	SO	SF
EC mS/cm	1,6	1,2	1,6	0,8	1,1	1,1	1,8	1,1	1,6	0,7	1,6
pH	5–6,2	5–6,2	5–6,2	5–6,2	5–6,2	5–6,2	5–6,2	5–6,2	5–6,2	5–6,2	5–6,2
<b>Macro-éléments mmol/l</b>											
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	1,1	0,7	0,7	0,3	0,3	0,75	0,7	0,7	1,5	0,8	1,0
K <sup>+</sup>	5,5	4,3	5,8	3,5	3,9	4,4	6,7	4,5	5,5	2,2	4,5
Ca <sup>2+</sup>	3,0	2,0	3,5	0,9	1,3	1,5	3,5	1,6	3,0	0,8	3,2
Mg <sup>2+</sup>	0,75	0,7	1,3	0,7	1,0	0,6	1,0	0,4	1,0	0,6	1,5
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10,6	7,3	11,2	4,7	6,4	7,3	13,0	7,2	11,2	4,3	11,2
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1,0	1,2	1,9	0,8	0,8	0,7	1,2	0,7	1,2	0,5	1,2
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	1,5	0,7	1,0	0,7	0,8	0,7	1,2	0,6	1,2	0,5	1,2
<b>Micro-éléments µmol/l</b>											
Fe	20	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Mn	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Zn	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
B	20	20	30	20	30	20	30	20	30	20	30
Cu	0,5	0,5	0,75	0,5	0,75	0,5	0,75	0,5	0,75	0,5	0,75
Mo	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

en pot en système fermé. Avec les systèmes d'irrigation fermés, il est important d'adapter les apports en éléments nutritifs à la consommation effective. Si les deux quantités ne correspondent pas globalement, la solution nutritive et le substrat peuvent souffrir d'un excès de certains éléments. Une analyse des éléments nutritifs et une adaptation de la solution nutritive doivent être faites à intervalles réguliers de trois à quatre semaines.

Les feuilles ne peuvent absorber que quelques éléments nutritifs. Ceux-ci agissent ensuite nettement plus rapidement que par absorption racinaire. Par conséquent, il est recommandé de corriger surtout les carences en oligo-éléments par une fertilisation foliaire.

Dans le tableau 2, les besoins en N de diverses plantes en container sont classés en trois groupes, ainsi que les besoins en P, en K et en Mg qui s'y rapportent. L'équilibre N:P:K:Mg est de 1,0:0,15:0,6:0,1. La meilleure méthode consiste à placer au milieu du container un engrais complètement enrobé à libération contrôlée. Il existe plusieurs méthodes efficaces pour l'épandage. Une fertilisation de base avec un engrais organo-minéral et une fertilisation complémentaire avec un engrais partiellement enrobé à libération contrôlée au printemps, peu après l'installation ou au rempotage, ont donné de bons résultats. Les avantages de cette stratégie sont un lessivage réduit et une salinité uniforme dans le substrat, ce qui a un effet positif sur le développement des racines, augmentant ainsi l'efficacité de l'irrigation.

### 3. Fleurs coupées sur substrat en serre

Pour les fleurs coupées sur substrat, des exigences élevées pour le substrat et la solution nutritive ont été établies pour la fertigation (figure 5). Le substrat sert de réservoir



Figure 5. Gerbera pour la fleur coupée, cultivé sur substrat en serre (photo: Agroscope).

à la plante jusqu'à une certaine mesure; elle y prélève les éléments nutritifs nécessaires à sa croissance. Les substrats sont aujourd'hui généralement d'origine organique ou minérale. Grâce à la fertigation, l'eau peut être économisée dans ces cultures et un apport optimal en nutriments peut être réalisé. La solution nutritive doit cependant être équilibrée et adaptée aux besoins de croissance des plantes ornementales cultivées sur substrat. Indépendamment du choix du système de fertigation (ouvert ou fermé), les nutriments du drainage doivent être utilisés de manière agronomiquement judicieuse. Les informations pour établir et adapter la solution nutritive, en systèmes ouverts et fermés, sont décrites en détail dans le module 14 (Carlen *et al.* 2017). Les solutions nutritives, en systèmes ouverts et fermés, pour diverses fleurs coupées, sont présentées dans le tableau 5. Par la suite, la fertilisation peut être contrôlée avec les normes relatives à la teneur optimale en éléments minéraux des solutions dans l'environnement des racines (tableau 6). Il est nécessaire de contrôler régulièrement la solution nutritive (pH et EC) et de compenser les variations afin de maintenir l'apport optimal en nutriments. En système ouvert, non recyclé, le drainage devrait représenter 20% de la quantité d'eau fournie; en système fermé, avec recyclage, le taux de drainage peut être plus élevé. La désinfection du drainage est à considérer dans la plupart des cas, mais elle n'est pas traitée dans ce document.

### 4. Fertilisation des fleurs coupées en pleine terre

Les fleurs coupées en pleine terre sont cultivées en plein champ, sous tunnel plastique ou sous serre (figure 6). Comme pour les plantes en pot, N est utilisé comme élément principal. Les normes de fertilisation pour les cultures annuelles et vivaces de fleurs coupées selon Jentzsch et Thalk (2007) sont répertoriées dans les ta-



Figure 6. Marguerite (*Leucanthemum vulgare*) pour la fleur coupée cultivée en pleine terre (photo: Agroscope).



**Tableau 8. Besoins en N des plantes vivaces cultivées en pleine terre pour la fleur coupée. N est l'élément principal et les autres macro-éléments P, K et Mg sont équilibrés par rapport à N (Jentzsch et Thal 2007).**

Espèce, groupe	Besoins en N <sup>1</sup>	Equilibre N:P:K:Mg (N:P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> :K <sub>2</sub> O:Mg)
<i>Asphodeline</i> <i>Astilbe</i> <i>Bergenia</i> <i>Carlina</i> <i>Centranthus</i> <i>Cimifuga</i> <i>Convallaria</i> <i>Dicentra spectabilis</i> <i>Doronicum</i> <i>Gladiolus</i> <i>Helleborus</i> <i>Hemerocallis</i>	<i>Leontopodium</i> <i>Lupinus</i> <i>Narcissus</i> <i>Ornithogalum</i> <i>Paeonia</i> <i>Penstemon</i> <i>Primula</i> <i>Pseudolysimachion spicatum</i> <i>Silene chalconica</i> <i>Solidaster luteus</i> <i>Thalictrum</i>	8 g N/m <sup>2</sup>  1,0:0,2:1,5:0,12 (1,0: 0,45:1,8: 0,15)
<i>Achillea millefolium</i> <i>Aconitum napellus</i> <i>Alchemilla mollis</i> <i>Alstroemeria</i> <i>Aquilegia</i> <i>Asclepias</i> <i>Asparagus officinalis</i> <i>Aster amellus</i> <i>A. ericoides</i> <i>A. novae-angliae</i> <i>A. novi-belgii</i> <i>A. pringlei</i> <i>Campanula glomerata</i> <i>Centaurea macrocephala</i> <i>Chelone obliqua</i> <i>Chrysanthemum x grandiflorum</i> <i>Coreopsis</i> <i>Cortaderia</i>	<i>Crocsmia</i> <i>Echinacea</i> <i>Eryngium</i> <i>Gentiana «Royal Blue»</i> <i>Goniolimon</i> <i>Gypsophila helenium</i> <i>Heliopsis</i> <i>Hosta</i> <i>Leucanthemum vulgare</i> <i>Liatris</i> <i>Monarda</i> <i>Phlox paniculata</i> <i>Physostegia</i> <i>Pseudolysimachion</i> <i>Scabiosa</i> <i>Sedum</i> <i>Trollius</i>	12 g N/m <sup>2</sup>  1,0: 0,2:1,5:0,12 (1,0:0,45:1,8:0,15)
<i>Achillea filipendulina</i> <i>Aconitum carmichaelii</i> <i>Astilbe x arendsii</i> <i>Cynara</i> <i>Delphinium</i> <i>Echinops</i> <i>Eremurus</i>	<i>Erigeron</i> <i>Gaillardia</i> <i>Helianthus</i> <i>Iris</i> <i>Ligularia</i> <i>Papaver</i> <i>Rudbeckia nitida</i>	15 g N/m <sup>2</sup>  1,0:0,2:1,5:0,12 (1,0:0,45:1,8:0,15)

<sup>1</sup> Il s'agit de lignes directrices. Les besoins peuvent être modifiés selon les conditions et les systèmes de culture. L'année de plantation, la fertilisation azotée doit être réduite d'environ 30%.

de besoins élevés en nutriments, les apports, surtout en azote, doivent être divisés en trois, afin de minimiser les pertes. Les engrais à libération contrôlée sont également possibles et permettent une fertilisation en une seule fois.

## 5. Conifères et arbustes en pépinière de pleine terre

Le niveau d'absorption en nutriments des conifères et des arbustes dépend principalement de la croissance des plantes, c'est-à-dire de la masse de pousses, de feuilles et de racines produites par hectare. Pour un apport régulier en nutriments sans à-coup de croissance, l'utilisation d'un engrais azoté longue durée est avantageuse.

Comme pour les plantes en pot et les fleurs coupées en pleine terre, N est également le principal élément fertilisant utilisé pour la pépinière de plein champ. Les normes de fertilisation azotée pour les conifères et les arbustes sont présentées dans des tableaux 9 et 10. L'apport en macro-éléments P, K et Mg est ensuite déterminé de

manière à garder un équilibre par rapport à N. L'équilibre suivant est conseillé: N:P:K:Mg = 1,0:0,5:0,6:0,1 (Wegmüller et Gysi 1993). La fertilisation P, K, Mg doit être adaptée pour qu'à moyen terme une analyse de sol montre des réserves suffisantes.

**Tableau 9. Besoins annuels en N pour les conifères en pépinière de pleine terre. N est l'élément principal et les autres macro-éléments P, K et Mg sont équilibrés par rapport à N<sup>1</sup>.**

Saison	Conifères	
	<i>Picea</i> (Epicéa)	<i>Abies</i> (Sapin)
	Besoins en N kg N/ha	Besoins en N kg N/ha
1 <sup>re</sup> –2 <sup>e</sup>	15–20	25–40
3 <sup>e</sup> –5 <sup>e</sup>	20–40	40–60
dès la 6 <sup>e</sup>	40–60	60–80

<sup>1</sup> N:P:K:Mg = 1,0:0,15:0,6:0,1 ou N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O:Mg = 1,0:0,34:0,73:0,1; Wegmüller et al. 2012.

**Tableau 10. Besoins annuels en N pour les arbustes en pépinière de pleine terre. N est l'élément principal et les autres macro-éléments P, K et Mg sont équilibrés par rapport à N<sup>1</sup>.**

Croissance en masse fraîche (sans les feuilles)	Arbustes <sup>2</sup>		
	Besoins en N kg N/ha		
	4–8 t/ha (densité faible)	6–12 t/ha (densité moyenne)	10–20 t/ha (densité élevée)
1 <sup>re</sup> –2 <sup>e</sup> saison	30–40	40–60	60–80
3 <sup>e</sup> –5 <sup>e</sup> saison	40–60	60–80	80–100
À partir de la 6 <sup>e</sup> saison	60–80	80–120	100–140

<sup>1</sup> N:P:K:Mg = 1,0:0,15:0,6:0,1 ou N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O:Mg = 1,0:0,34:0,73:0,1; Wegmüller et Gysi 1993; Wegmüller et al. 2012.

<sup>2</sup> Pas de fertilisation azotée l'année de plantation, mais pour P-K-Mg considérer la fertilisation de base.

## 6. Bibliographie

- Carlen C. & Ançay A., 2017. 14/ Principes de fertilisation des cultures de baies. In: Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF; Ed. S. Sinaj & W. Richner). Recherche Agronomique Suisse 8 (6), publication spéciale, 14/1–14/12.
- Gysi C., v. Allmen F., Heller W., Poffet J. & Wegmüller H. P., 1995. Substratuntersuchung für den Zierpflanzenbau. Flugschrift 113, Eidgenössische Forschungsanstalt für Obst-, Wein-, und Gartenbau, Wädenswil, 11 p.
- Jentzsch M. & Thalk J., 2007. Production von Freiland-schnittblumen. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart, 184 p.
- Pivot D., Gilli C. & Carlen C., 2005. Données de base pour la fumure des cultures de légumes, de fleurs et de fraises sur substrat. Revue suisse de Viticulture, Arboriculture et Horticulture 34 (4), 3–8.

- Röber R. & Schacht H., 2008. Pflanzenernährung im Gartenbau. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart, 444 p.
- Scharpf H. C., 1989. Pflanzenernährung im Zierpflanzenbau – wohin geht die Entwicklung? In: Düngen im Zierpflanzenbau. Lehr und Versuchsanstalt für Gartenbau Hannover Ahlem. Verlag Bernhard Thalacker, Braunschweig, 7–16.
- Wartenberg S., 2008. Düngungsrichtlinien Zierpflanzenbau. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 20, 120 p.
- Wegmüller H. P. & Gysi C., 1993. Düngung in der Freilandbaumschule. Flugschrift 131, Eidgenössische Forschungsanstalt für Obst-, Wein- und Gartenbau, Wädenswil, 23 p.
- Wegmüller H. P., Heckly C., Oester P. & Frühhaber P., 2012. Das Wichtigste zur Düngung. Hauert HGB Dünger AG (Hrsg.), Grossaffoltern, 7. Auflage, 99 p.

## 7. Liste des tableaux

Tableau 1. Normes fertilisation pour les principales espèces de plantes en pot. N est l'élément principal et les autres macro-éléments P, K et Mg sont équilibrés par rapport à N. ....	16/4
Tableau 2. Normes de fertilisation pour arbres en container. N est l'élément principal; l'apport des autres macro-éléments P, K et Mg se fait selon un équilibre par rapport à N. ....	16/5
Tableau 3. Eléments fertilisants solubles dans l'eau par litre de substrat selon la méthode d'extraction en volume 1:1,5. Le niveau de base correspond au niveau de conservation pendant la durée de culture. ....	16/6
Tableau 4. Tolérance à la salinité, ajustement de l'électroconductivité (EC) de la solution nutritive pour une fertilisation liquide (fertilisation complémentaire ou fertigation) et plage optimale dans le substrat pour diverses espèces de plantes. ....	16/6
Tableau 5. Compositions des solutions nutritives pour les plantes en pot et fleurs coupées sur substrat organique en système fermé (SF) et en système ouvert (SO). ....	16/6
Tableau 6. Concentrations optimales en éléments minéraux des solutions de l'environnement des racines dans les substrats en cultures de plantes en pot et fleurs coupées. ....	16/8
Tableau 7. Besoins en N pour les cultures annuelles de fleurs coupées en pleine terre. N est l'élément principal et les autres macro-éléments P, K et Mg sont équilibrés par rapport à N, avec une adaptation de la fertilisation azotée selon les expériences faites en Suisse. ....	16/8
Tableau 8. Besoins en N des plantes vivaces cultivées en pleine terre pour la fleur coupée. N est l'élément principal et les autres macro-éléments P, K et Mg sont équilibrés par rapport à N. ....	16/9
Tableau 9. Besoins annuels en N pour les conifères en pépinière de pleine terre. N est l'élément principal et les autres macro-éléments P, K et Mg sont équilibrés par rapport à N. ....	16/10
Tableau 10. Besoins annuels en N pour les arbustes en pépinière de pleine terre. N est l'élément principal et les autres macro-éléments P, K et Mg sont équilibrés par rapport à N. ....	16/10

## 8. Liste des figures

Figure 1. Primevères ( <i>Primula acaulis</i> ) cultivées en pot. ....	16/3
Figure 2. L'étoile de Noël, une plante en pot importante ( <i>Poinsettia</i> , <i>Euphorbia pulcherrima</i> ). ....	16/3
Figure 3. Calluna ( <i>Calluna vulgaris</i> ) cultivée en pot. ....	16/3
Figure 4. Dans un récipient, faire une marque à 200 ml et une à 300 ml pour déterminer le pH et l'EC d'un substrat. ....	16/5
Figure 5. Gerbera pour la fleur coupée, cultivé sur substrat en serre. ....	16/7
Figure 6. Marguerite ( <i>Leucanthemum vulgare</i> ) pour la fleur coupée cultivée en pleine terre. ....	16/7







## 17/ Annexes

Sokrat Sinaj<sup>1</sup>, Regula Wolz<sup>2</sup> et Walter Richner<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Agroscope, 1260 Nyon, Suisse

<sup>2</sup> Agroscope, 3003 Berne, Suisse

<sup>3</sup> Agroscope, 8046 Zurich, Suisse

Renseignements: [sokrat.sinaj@agroscope.admin.ch](mailto:sokrat.sinaj@agroscope.admin.ch)

## Table des matières

Annexe 1. Eléments nutritifs et facteurs de conversion .....	17/3
Annexe 2. Liste des abréviations .....	17/5
Annexe 3. Définition de notions importantes .....	17/6
Annexe 4. Liste de terminologie .....	17/8
Annexe 5. Autrices et auteurs .....	17/13
Annexe 6. Coordinateurs .....	17/15

## Annexe 1. Eléments nutritifs et facteurs de conversion

Connu		Facteur	Recherché	
Elément ou molécule	Dénomination usuelle		Elément ou molécule	Dénomination usuelle
N	azote	4,427	NO <sub>3</sub>	nitrate
N	azote	1,214	NH <sub>3</sub>	ammoniac
N	azote	1,286	NH <sub>4</sub>	ammonium
N	azote	2,857	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	nitrate d'ammonium
N	azote	4,716	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	sulfate d'ammonium
N	azote	2,144	CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O	urée
NO <sub>3</sub>	nitrate	0,226	N	azote
NH <sub>3</sub>	ammoniac	0,824	N	azote
NH <sub>4</sub>	ammonium	0,778	N	azote
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	nitrate d'ammonium	0,350	N	azote
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	sulfate d'ammonium	0,212	N	azote
CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O	urée	0,466	N	azote
P	phosphore	2,291	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	anhydride phosphorique (unité conventionnelle)
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	anhydride phosphorique (unité conventionnelle)	0,436	P	phosphore
K	potassium	1,205	K <sub>2</sub> O	oxyde de potassium (unité conventionnelle)
K <sub>2</sub> O	oxyde de potassium (unité conventionnelle)	0,830	K	potassium
Ca	calcium	2,497	CaO	oxyde de calcium (chaux vive)
Ca	calcium	1,399	Ca(OH) <sub>2</sub>	hydroxyde de calcium (chaux éteinte)
Ca	calcium	1,850	CaCO <sub>3</sub>	carbonate de calcium (calcaire)
Ca	calcium	4,297	CaSO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O	sulfate de calcium (gypse)
CaO	oxyde de calcium (chaux vive)	0,715	Ca	calcium
CaO	oxyde de calcium (chaux vive)	1,785	CaCO <sub>3</sub>	carbonate de calcium (calcaire)
CaO	oxyde de calcium (chaux vive)	1,321	Ca(OH) <sub>2</sub>	hydroxyde de calcium (chaux éteinte)
Ca(OH) <sub>2</sub>	hydroxyde de calcium (chaux éteinte)	0,540	Ca	calcium
Ca(OH) <sub>2</sub>	hydroxyde de calcium (chaux éteinte)	0,757	CaO	oxyde de calcium (chaux vive)
Ca(OH) <sub>2</sub>	hydroxyde de calcium (chaux éteinte)	1,351	CaCO <sub>3</sub>	carbonate de calcium (calcaire)
CaCO <sub>3</sub>	carbonate de calcium (calcaire)	0,400	Ca	calcium
CaCO <sub>3</sub>	carbonate de calcium (calcaire)	0,561	CaO	oxyde de calcium (chaux vive)
CaCO <sub>3</sub>	carbonate de calcium (calcaire)	0,740	Ca(OH) <sub>2</sub>	hydroxyde de calcium (chaux éteinte)
CaSO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O	sulfate de calcium (gypse)	0,233	Ca	calcium
Mg	magnésium	1,658	MgO	oxyde de magnésium
Mg	magnésium	4,951	MgSO <sub>4</sub>	sulfate de magnésium
Mg	magnésium	3,472	MgCO <sub>3</sub>	carbonate de magnésium
MgO	oxyde de magnésium	0,603	Mg	magnésium
MgO	oxyde de magnésium	2,986	MgSO <sub>4</sub>	sulfate de magnésium
MgO	oxyde de magnésium	2,093	MgCO <sub>3</sub>	carbonate de magnésium
MgSO <sub>4</sub>	sulfate de magnésium	0,202	Mg	magnésium
MgSO <sub>4</sub>	sulfate de magnésium	0,335	MgO	oxyde de magnésium
MgSO <sub>4</sub>	sulfate de magnésium	0,701	MgCO <sub>3</sub>	carbonate de magnésium
MgCO <sub>3</sub>	carbonate de magnésium	0,288	Mg	magnésium
MgCO <sub>3</sub>	carbonate de magnésium	0,476	MgO	oxyde de magnésium
MgCO <sub>3</sub>	carbonate de magnésium	1,427	MgSO <sub>4</sub>	sulfate de magnésium

Connu		Facteur	Recherché	
Élément ou molécule	Dénomination usuelle		Élément ou molécule	Dénomination usuelle
S	soufre	2,995	SO <sub>4</sub>	sulfate
S	soufre	2,498	SO <sub>3</sub>	sulfite
SO <sub>4</sub>	sulfate	0,334	S	soufre
SO <sub>3</sub>	sulfite	0,401	S	soufre
B	bore	5,627	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	acide borique
B	bore	8,819	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> · 10H <sub>2</sub> O	borax
B	bore	3,220	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	anhydride borique
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	anhydride borique	0,311	B	bore
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	anhydride borique	1,777	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	acide borique
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	anhydride borique	2,739	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> · 10H <sub>2</sub> O	borax
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	acide borique	0,178	B	bore
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	acide borique	1,567	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> · 10H <sub>2</sub> O	borax
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	acide borique	0,572	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	anhydride borique
Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> · 10H <sub>2</sub> O	borax	0,113	B	bore
Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> · 10H <sub>2</sub> O	borax	0,638	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	acide borique
Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> · 10H <sub>2</sub> O	borax	0,365	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	anhydride borique
Mn	manganèse	4,061	MnSO <sub>4</sub> · 4H <sub>2</sub> O	sulfate de manganèse
Mn	manganèse	3,603	MnCl <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	chlorure de manganèse
MnSO <sub>4</sub> · 4H <sub>2</sub> O	sulfate de manganèse	0,246	Mn	manganèse
MnCl <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	chlorure de manganèse	0,278	Mn	manganèse
Cu	cuivre	3,928	CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	sulfate de cuivre
CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	sulfate de cuivre	0,255	Cu	cuivre
Mo	molybdène	1,840	(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub> · 4H <sub>2</sub> O	molybdate d'ammonium
Mo	molybdène	2,522	Na <sub>4</sub> MoO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	molybdate de sodium
(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub> · 4H <sub>2</sub> O	molybdate d'ammonium	0,543	Mo	molybdène
Na <sub>4</sub> MoO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	molybdate de sodium	0,397	Mo	molybdène
Fe	fer	4,979	FeSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	sulfate de fer
FeSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	sulfate de fer	0,201	Fe	fer
Zn	zinc	4,398	ZnSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	sulfate de zinc
ZnSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	sulfate de zinc	0,227	Zn	zinc

## Annexe 2. Liste des abréviations

AAE10	extraction à l'acétate d'ammonium + EDTA, rapport sol:extractant 1:10	MF	matière fraîche
ADCF	Association pour le développement de la culture fourragère	Mg	magnésium
ADN	acide désoxyribonucléique	MgCO <sub>3</sub>	carbonate de magnésium
AGMI	acides gras mono-insaturés (monounsaturated fatty acids)	MJ	mégajoule
AGPI	acides gras poly-insaturés (polyunsaturated fatty acids)	mm	millimètre
Al	aluminium	Mn	manganèse
B	bore	Mo	molybdène
C	carbone	MO	matière organique
Ca	calcium	MS	matière sèche
CaCl <sub>2</sub>	extraction à chlorure de calcium, rapport sol:extractant 1:10	N	azote
Ca(OH) <sub>2</sub>	hydroxyde de calcium, chaux éteinte	N <sub>disp</sub>	azote disponible
CaCO <sub>3</sub>	carbonate de calcium (calcaire)	NH <sub>3</sub>	ammoniac
CaO	oxyde de calcium, chaux vive	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	ammonium
CE	conductivité électrique	N <sub>min</sub>	azote minéral
CEC	capacité d'échange des cations	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	nitrate
Cl	chlore	N <sub>soluble</sub>	formes d'azote solubles dans l'eau
cm	centimètre	N <sub>tot</sub>	azote total
CO <sub>2</sub>	extraction à l'eau saturée de dioxyde de carbone, rapport sol:extractant 1:2,5	O	oxygène
Cu	cuivre	OFAG	Office fédéral de l'agriculture
DBF	données de base pour la fumure	OFEV	Office fédéral de l'environnement
dt	décitonne	P	phosphore
EDP	énergie digestible pour le porc	P <sub>disp</sub>	phosphore disponible
EDTA	éthylène diamine tétra-acétique	P <sub>min</sub>	phosphore minéral
Fe	fer	P <sub>org</sub>	phosphore organique
FiBL	Institut de recherche de l'agriculture biologique	P <sub>tot</sub>	phosphore total
g	gramme	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	anhydride phosphorique (pentoxyde de phosphore)
GTPI	Groupe de Travail pour la Production fruitière Intégrée	PE	place de poulet à l'engrais
H	hydrogène	PER	prestations écologiques requises
ha	hectare	PI	production intégrée
H <sub>2</sub> O10	extraction à l'eau 1:10	PP	place de poule pondeuse
IPMI	indice acides gras poly- / mono-insaturés (PUFA-MUFA-Index est souvent plus usité)	PPE	place de porc à l'engrais
ISCM	inspectorat de la branche suisse du compostage et de la méthanisation	ppm	parts per million (parties par million)
K	potassium	PRIF	principes de fertilisation
K <sub>tot</sub>	potassium total	PT	poste de traite
K <sub>disp</sub>	potassium disponible	PTE	place de truie d'élevage
K <sub>2</sub> O	oxyde de potassium	S	soufre
kg	kilogramme	S <sub>min</sub>	soufre minéral
l	litre	S <sub>org</sub>	soufre organique
m	mètre	S <sub>tot</sub>	soufre total
MA	matière azotée	SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	sulfite
		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	sulfate
		t	tonne
		TS	taux de saturation
		UGB	unité gros bétail
		Zn	zinc

### Annexe 3. Définitions de notions importantes

Notion	Explication
Anion	Un atome (ou une molécule) qui a gagné un ou plusieurs électrons. La charge électrique de l'anion est négative.
Antagonisme	Concurrence entre les éléments nutritifs présents sous forme d'ions. La concentration élevée d'un élément ou de plusieurs éléments empêche l'absorption d'un autre élément qui se trouve en concentration plus faible.
Azote disponible ( $N_{disp}$ )	Part du N total ou teneur en N des résidus de récolte, des engrais de ferme, des engrais de recyclage et des engrais verts, disponible pour la plante à court et moyen terme, lorsque le mode d'exploitation est optimal. Cette valeur n'est pas identique au N utilisable par les plantes, car une partie du N organique est aussi disponible en dehors de la phase de la formation du rendement. Le N disponible en dehors de la phase de formation du rendement peut engendrer une augmentation de la teneur en N des produits principaux ou secondaires désirée (ex: céréales) ou non désirée (ex: betterave sucrière, légumes à feuilles) ou une augmentation du lessivage des nitrates, plus particulièrement en grandes cultures et en culture maraîchère de plein champ.
Azote soluble ( $N_{soluble}$ )	Formes de N solubles à l'eau (ammonium, urée, etc.) notamment dans les déjections des animaux de rente et les engrais de ferme.
Azote total ( $N_{tot}$ )	Somme de toutes les formes de N (organique et minéral).
Capacité d'échange cationique (CEC)	Quantité de cations qu'un sol peut retenir sur son complexe adsorbant à un pH donné (selon la méthode d'analyse choisie). La CEC peut être utilisée comme mesure de la fertilité d'un sol car elle indique sa capacité de rétention des éléments nutritifs (sous forme de cations). Plus un sol est riche en argile et en matière organique, plus sa CEC est élevée.
Carence	Déficit latent ou aigu d'un élément nutritif particulier qui peut être visible ou invisible. Une carence visible provoque chez chaque type de plante des symptômes caractéristiques; une carence invisible, plus fréquente, ne sera détectée que par analyse et/ou sur la base d'une comparaison de différents procédés de fertilisation.
Cation	Un atome (ou une molécule) qui a perdu un ou plusieurs électrons. La charge électrique du cation est positive.
Chaulage	Apport d'amendements calciques sur les sols acides visant à augmenter le pH et à prévenir une nouvelle acidification.
Chlorose, chlorotique	Symptôme révélant un manque de chlorophylle (symptôme de carence): coloration des feuilles en jaune pouvant évoluer jusqu'à des symptômes de brûlure (nécrose).
Coefficient apparent d'utilisation de l'azote (CAU)	Fraction du N total d'un engrais (minéral ou organique) qui est absorbée par la culture jusqu'à la récolte. CAU se calcule à partir d'essais comparant les quantités d'azote absorbées par la culture dans un traitement fertilisé ( $N_{absFert}$ ) et dans un témoin non-fertilisé ( $N_{absTem}$ ): $CAU (\%) = (N_{absFert} - N_{absTem}) / X \cdot 100$ où X = dose de N apportée dans le traitement fertilisé.
Compost de fumier	Fumier stocké pendant plus de six mois et brassé plusieurs fois. La structure de la paille ou d'autres litières n'est plus visible. Teinte brun foncé. Matériel de base: fumier frais ou fumier de stabulation libre produit par des bovins, fumier d'autres espèces animales.
Crottes de poules	Totalité des déjections des volailles collectées dans les poulaillers avec tapis à crottes.
Efficacité de N	Effet de l'azote des engrais organiques sur le rendement et la qualité des plantes. La valeur est exprimée en % de l'effet obtenu par une même quantité de N contenu dans un engrais minéral de référence, en général le nitrate d'ammonium. Avec les cultures dont la période de croissance ne couvre pas la totalité de la saison (p. ex. céréales, pommes de terre) ainsi qu'en cas de mauvaise gestion des engrais organiques, l'efficacité du N de ces engrais est souvent plus faible. En revanche, les pertes sont plus élevées.
Engrais sous forme de chélates	Engrais au pH stable ayant une charge neutre et restant disponibles pour les plantes sur une longue durée avant d'être fixés dans le sol. La forme chélate protège les éléments nutritifs, en particulier les micro-éléments, et en améliore l'absorption par les plantes.
Exportations (d'éléments nutritifs)	Quantité d'éléments nutritifs qui sortent du champ avec les produits récoltés.
Facteur de correction	Facteur permettant d'adapter la norme de fumure à des niveaux de fertilité du sol différents de l'optimum, ainsi qu'au site et à la culture.
Fatigue des sols	Mauvaise croissance des plantes et diminution du rendement consécutives à la répétition de la même culture sur un même terrain. Les causes peuvent être liées à la physique ou à la chimie du sol ainsi qu'au développement de maladies ou de ravageurs.
Fertigation	Apport d'engrais liquides ou solubles à travers l'eau d'arrosage.
Fumier au tas	Fumier stocké pendant au moins trois mois sur une place en dur à l'extérieur de l'étable et sans traitement particulier. La structure de la litière est encore bien visible. Teinte brun foncé à verdâtre. Matériel de base: fumier frais de bovins.

Fumier composté	Fumier stocké pendant plus de trois mois et brassé au moins une fois. La structure de la litière est à peine visible. Couleur brune. Matériel de base: fumier frais ou fumier de stabulation libre provenant de l'élevage de bovins ainsi que fumier d'autres espèces animales.
Fumier de poules, de poulets ou de dindes	Totalité des déjections des volailles mélangée à de la litière.
Fumier de stabulation libre	Fumier de stabulation libre à litière profonde. Contient la totalité des fèces et des urines ainsi que de la litière.
Fumier de veau, porc, cheval, mouton et chèvre	Fumier qui a été stocké plus de trois mois sur une place en dur en dehors de l'étable et sans manutention particulière. La structure de la paille ou d'autres litières est encore parfaitement visible. Contient en plus de la litière, la totalité des fèces et une part variable des urines produites.
Fumier frais	Fumier stocké pendant moins d'un mois.
Fumure foliaire	Fertilisation au moyen d'engrais appliqués sur le feuillage et dont les éléments nutritifs sont absorbés de manière passive à travers la surface des feuilles.
Granulométrie	Répartition des particules de sol selon leur grosseur (argile, limon et sable). Elle est déterminée par analyse voire par un test tactile (moins précis).
Humus	Ensemble des substances organiques mortes dans le sol.
Ion	Élément chimique (atome ou molécule) portant une charge électrique. On distingue les ions négatifs (anions) et les ions positifs (cations).
Lisier	Totalité des déjections animales (fèces et urine), plus éventuellement de la litière (paille hachée, sciure, copeaux, etc.).
Macronutriment	Éléments nutritifs essentiels dont les plantes ont besoin en quantités relativement importantes. P. ex.: N, P, K, Mg, Ca et S.
Matière organique du sol	Ensemble des composants du sol d'origine animale ou végétale. 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 constitue l'humus.
Micronutriments (oligo-éléments)	Éléments nutritifs essentiels dont les plantes ont besoin en quantités relativement modestes. Par ex.: Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo et d'autres selon les auteurs.
Nécrose	Dépérissement de tissus végétaux, p. ex. à cause d'une carence en éléments nutritifs.
Norme de fertilisation azotée	Pour une culture donnée, quantité d'azote à apporter dans une situation standard pour obtenir le rendement de référence observé en Suisse ainsi qu'une récolte de qualité irréprochable pour cette culture.
Norme de fertilisation (P, K, Mg)	Pour une culture donnée, quantité de P, K ou Mg à apporter pour obtenir le rendement de référence observé en Suisse ainsi qu'une récolte de qualité irréprochable lorsque le sol est normalement pourvu. Cette norme ne tient pas compte des résidus de récolte de la culture précédente et correspond à la quantité de P, K ou Mg prélevée par la culture, corrigée en fonction de la capacité spécifique des cultures à prélever les éléments nutritifs dans le sol.
Phosphate, orthophosphate	Les formes ioniques présentes dans la solution du sol et prélevées par les plantes sont $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ et $\text{HPO}_4^{2-}$ . Les proportions de ces deux formes varient selon le pH du sol.
Phosphore disponible du sol ( $\text{P}_{\text{disp}}$ )	Quantité totale de P du sol susceptible d'aboutir dans la solution du sol sous forme d'anions orthophosphates pendant la durée de croissance de la culture.
Prélèvements (d'éléments nutritifs)	Totalité des éléments nutritifs prélevés dans le sol (ou dans l'air) par les plantes (sans les chaumes ni les racines).
Purin	Urine des animaux avec une proportion variable de fèces (selon système de stabulation et quantité de litière).
Résidus de récolte	Résidus de plantes (ou sous-produits) qui restent sur le sol après la récolte (paille des céréales, fanes de pomme de terre, feuilles et collets de betterave, etc.).
Saturation des bases (SB)	Part (%) des places d'échange d'après la capacité d'échange cationique (CEC) qui sont occupées par les cations $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{K}^+$ et $\text{Na}^+$ .
Sol acide	Sol avec un pH < 6,8 (mesuré dans une suspension d'eau).
Sol alcalin	Sol avec un pH > 7,2 (mesuré dans une suspension d'eau).
Sol neutre	Sol avec un pH compris entre 6.8 et 7.0 (mesuré dans une suspension d'eau).
Teneur en azote minéral du sol ( $\text{N}_{\text{min}}$ )	Somme des teneurs en azote nitrique et en azote ammoniacal.
Troubles physiologiques	Affaiblissement d'une plante qui n'est pas causé par un agent pathogène ni par un ravageur mais qui est d'origine nutritionnelle, climatique ou non identifiable.
Valeurs indicatives des teneurs en éléments nutritifs dans les engrais de ferme	Teneurs établies le plus souvent à partir de plans d'affouragement avec plusieurs rations selon l'espèce animale. Tiennent compte aussi d'analyses d'engrais de ferme dans des exploitations de la pratique. Dans des cas particuliers, d'importantes variations de teneurs peuvent survenir selon l'affouragement et le système de stabulation.

## Annexe 4. Liste de terminologie

La liste de terminologie a été établie dans le cadre des traductions effectuées pour les PRIF 2017.

Aucune garantie n'est donnée quant à l'exactitude et à l'exhaustivité des termes.

Pour d'autres termes techniques spécifiques, veuillez vous référer au dictionnaire de terminologie agricole d'Agroscope: [www.agroterm.ch](http://www.agroterm.ch)

F	I	D
aération	aerazione (del suolo)	Durchlüftung
aération du lisier/purin	aerazione dei liquami	Güllebelüftung
affouragement par phases	foraggiamento a fasi	Phasenfütterung
agriculture biologique	agricoltura biologica	Landbau, biologischer
altération chimique	alterazione chimica	Verwitterung, chemische
amendements calciques	ammendanti calcarei	Kalkdünger
analyse foliaire	analisi fogliare	Blattuntersuchung, Blattanalyse
analyses du sol	analisi del suolo	Bodenuntersuchungen
année principale d'utilisation	anno di sfruttamento principale	Hauptnutzungsjahr
apport	apporto	Gabe
apport d'engrais	distribuzione di concime, apporto di concime	Düngergabe
approvisionnement des plantes en N	approvvigionamento delle piante in N	N-Ernährung der Pflanzen
aptitudes culturales du sol	idoneità del suolo per la coltura prevista	Anbaueignung des Bodens
arrière-effet	effetto residuo	Nachwirkung
arrière-effet azoté	effetto residuo dell'azoto	Stickstoffnachlieferung
assolement, rotation des cultures	rotazione culturale	Fruchtfolge
autres plantes	altre erbe	Kräuter
azote ammoniacal	azoto ammoniacale	Ammoniumstickstoff
bactéries des nodosités	batteri dei noduli radicali	Knöllchenbakterien
Banque de données sur le trafic des animaux (BDTA)	Banca dati sul traffico di animali (BDTA)	Tierverkehrsdatenbank (TDV)
besoins	fabbisogno	Bedarf
besoins en soufre	fabbisogno in zolfo	Schwefelbedarf
besoins nets en éléments nutritifs	fabbisogno netto in elementi nutritivi	Nettonährstoffbedarf
besoins nutritionnels	fabbisogno in elementi nutritivi	Nährstoffbedarf
bilan des éléments nutritifs	bilancio degli elementi nutritivi	Nährstoffbilanz
bilan fourrager	bilancio foraggero	Futterbilanz
buses pivotantes	ugello orientabile	Schwenkdüsen
buttage	rincalzatura	Dammaufbau (Häufeln)
cahier des exigences	lista delle esigenze	Anforderungskatalog
calculs de bilans	calcolo dei bilanci	Bilanzrechnungen
calculs des flux d'éléments nutritifs	calcolo dei flussi di elementi nutritivi	Nährstoffflussberechnungen
capacité d'ingestion	capacità d'assimilazione (bestiame)	Futteraufnahmefähigkeit (der Tiere)
capacité d'absorption	capacità d'assorbimento	Nährstoffaneignungsvermögen
capacité de stockage en éléments nutritifs	capacità di ritenzione degli elementi nutritivi	Nährstoffspeicherkapazität
capacité d'échange de cations (CEC)	capacità di scambio cationico (CSC)	Kationenaustauschkapazität (KAK)
capacité hydrique	ritenzione idrica (suolo)	Wasserspeicherung
caractérisation du site	caratterizzazione del sito	Standorteigenschaften
carence aigüe	carezza acuta	Mangel, akuter
carence en soufre	carezza di zolfo	Schwefelmangel
carence latente (déficience)	carezza latente (deficienza)	Mangel, latenter
chaulage	calcitazione, ammendamento calcareo	Kalkung
chaulage de correction	calcitazione di correzione	Aufkalkung
chaulage d'entretien	calcitazione di mantenimento	Erhaltungskalkung
chaux d'algues marines	calcare d'alghe marine	Meeralgenkalk
chaux éteinte	calce spenta	Löschkalk
chaux humide	calce umidificata	Feuchtkalk
chaux vive	calce viva	Branntkalk
classe de fertilité, fertilité/richeesse du sol	classe di fertilità	Versorgungsklasse



coefficient apparent d'utilisation de l'azote (CAU)	coefficiente di utilizzazione apparente dell'azoto (CUA)	scheinbare Stickstoffausnutzung
communauté de plantes	associazione vegetale	Pflanzengemeinschaft
composants du sol	componenti del suolo	Bodenbestandteile
composition botanique	composizione botanica	Zusammensetzung, botanische
concentration critique	concentrazione critica	Konzentration, kritische
concept de fertilisation	concetto di concimazione	Düngungskonzept
Conférence suisse des stations d'arboriculture	Conferenza svizzera delle stazioni d'arboricoltura	Schweizerische Konferenz der Obstfachstellen (SKOF)
consommation de luxe	consumo di lusso	Luxuskonsum
coupe, cycle d'utilisation	sfalcio, ricrescita	Aufwuchs, Schnitt, Futteraufwuchs
couvert associé	consociazione	Mischkultur
couverts végétaux	copertura vegetale	Begrünung
culture dérobée, culture intermédiaire, interculture	coltura intercalare	Zwischenfrucht, Zwischenkultur
cycle de pâture	turno (pascolo)	Weidenutzung, einzelne
cycle des éléments nutritifs	ciclo degli elementi nutritivi	Nährstoffkreislauf
début/reprise de la végétation	risveglio vegetativo	Vegetationsbeginn
défecteur	deflettore a piattello	Prallteller
digestats liquides	digestati liquidi	Gärgut, flüssiges
digestats solides	digestati solidi	Gärgut, festes
disponibilité de l'azote	disponibilità d'azoto	N-Verfügbarkeit, Stickstoffverfügbarkeit
disponibilité en éléments nutritifs	disponibilità in elementi nutritivi	Nährstoffangebot
disponibilité pour les plantes	disponibilità per le piante	Pflanzenverfügbarkeit
distribution large	dispersione nell'aria (liquami)	Breitverteilung
dosage	dosaggio	Aufwandmenge
dose d'engrais	quantità di concime	Düngermenge
durée de vide sanitaire	vuoto sanitario	Leerzeit
échantillonnage, prélèvement d'échantillon(s)	campionamento (del suolo)	Proben(ent)nahme
écoulement des eaux de surface	ruscellamento	Oberflächenabfluss
effet calcaire	effetto del calcare	Kalkwirkung
effet foliaire	effetto fogliare, effetto sulle foglie	Blattwirkung
élément nutritif	elemento nutritivo	Nährstoff
éléments mineurs, micro-éléments	microelementi, oligoelementi	Spurenelemente (Mikronährstoffe)
éléments nutritifs excrétés ou déjections	elementi nutritivi escreti dal bestiame	Nährstoffausscheidungen
émissions d'ammoniac (NH <sub>3</sub> )	emissioni d'ammoniaca (NH <sub>3</sub> )	Ammoniakemissionen (NH <sub>3</sub> )
enfouissement du lisier	incorporazione del liquame nel suolo	Gülledrill
enfouisseur à lisier	tubi semirigidi con assolcatore per incorporare o iniettare liquami nel suolo	Gülleschlitzgeräte
engrais à base de résidus de récolte	concime a base di residui colturali	Rückständerdünger
engrais à base d'éléments chélatés	concime contenente chelati	Chelatdünger
engrais composés	concime composto	Mehrnährstoffdünger
engrais de ferme	concimi aziendali	Hofdünger
engrais de recyclage	concime ottenuto dal riciclaggio	Abfalldünger, Recyclingdünger
engrais minéraux	concime minerale	Mineraldünger
engrais minéraux azotés	concime minerale azotato	Stickstoffdünger, mineralische
engrais simples	concime semplice	Einzelnährstoffdünger
engrais verts	sovescio	Gründüngung
épandage des engrais de ferme	distribuzione di concimi aziendali	Hofdüngergaben
épandage des engrais de ferme	distribuzione di concimi aziendali	Hofdüngern, Ausbringung von
épandage du fumier	distribuzione di letame	Mistausbringung
épandage fractionnés	distribuzione unica, apporto unico	Einzelgaben
épandeur à disque	spandiconcime centrifugo a dischi	Scheibenstreuer
épandeur à disques	spandiletame a piattelli	Tellerstreuer
épandeur à fumier	spandiletame	Miststreuer
épandeur à rampe	spandiconcime a caduta	Auslegerstreuer

épandeur à tube oscillant	spandiconcime centrifugo a tubo oscillante	Pendelrohrstreuer
épandeur à vis	spandiconcime a caduta a coclea	Schneckenstreuer
épandeur centrifuge	spandiconcime centrifugo	Schleuderstreuer
épandeur latéral	spandiletame a distribuzione laterale	Seitenstreuer
épandeur monocoque	spandiletame monoscocca ribassato	Muldenstreuer
épandeur pendulaire	distributore oscillante	Pendelverteiler
épandeur pneumatique	spandiconcime a caduta pneumatico	Pneumatikstreuer
épandeur universel	spandiletame polivalente	Universalstreuer
état calcique du sol	tenore in CaCO <sub>3</sub> del suolo	Kalkgehalt
état d'approvisionnement, état de nutrition	approvvigionamento in elementi nutritivi	Nährstoffversorgung des Bodens
exploitation (mode d')	gestione	Bewirtschaftung
exploitations herbagères	aziende a vocazione foraggera	Graslandbetriebe
exsudats racinaires	essudati radicali	Wurzelausscheidungen
extrait à l'eau	estratto all'acqua	Wasserextrakt
facteur de correction	fattore di correzione	Korrekturfaktor
fermentation de produits solides	fermentazione di sostanze solide	Feststoffvergärung
fertigation (irrigation fertilisante)	fertirrigazione	Fertigation
fertilisation	concimazione	Düngung
fertilisation azotée	concimazione azotata	Stickstoffdüngung
fertilisation de complément	concimazione integrativa	Aufdüngung
fertilisation de couverture, fumure de couverture	concimazione di copertura	Kopfdüngung
fertilisation de fond, fumure de fond	concimazione di base	Grunddüngung
fertilisation phosphatée	concimazione fosfatica	Phosphordüngung
fertilisation potassique	concimazione potassica	Kaliumdüngung
fixation d'azote	fissazione dell'azoto	Stickstofffixierung
fixation symbiotique de l'azote	fissazione simbiotica dell'azoto	Stickstofffixierung, symbiotische
flux d'éléments nutritifs	flussi di elementi nutritivi	Nährstoffflüsse
formation d'agrégats	formazione di aggregati	Gefügebildung
fourchure (des carottes)	biforcute (carote)	Beinigkei (Karotten)
friable (sol)	friabile (suolo)	bröckelig (Boden)
fumier au tas	letame di mucchio	Stapelmist
fumier de stabulation	letame	Stallmist
fumier de stabulation libre	letame di stabulazione libera	Laufstallmist
graminées	graminacee	Gräser
granulométrie	granulometria	Körnung
Groupe de Travail pour la Production fruitière Intégrée (GTPI)	Gruppo di lavoro svizzero per la produzione integrata in frutticoltura (GLPI)	Schweizerische Arbeitsgruppe für Integrierte Obstproduktion (SAIO)
herbages	superfici prative	Grasland, Wiesland
herbages permanents	superfici prative permanenti	Naturwiesen
herbages temporaires, prairies temporaires	prati temporanei	Kunstwiesen
horizon (couche de sol)	orizzonte pedologico	Bodenschicht
immobilisation des éléments nutritifs	immobilizzazione degli elementi nutritivi	Immobilisierung von Nährstoffen
indication pour l'application	prescrizioni d'utilizzazione	Anwendungshinweis
indice de nutrition	indice di nutrizione	Versorgungsindex
indice de nutrition	indice di nutrizione (IN)	Gehaltsindex, Ernährungsindex, Versorgungsindex
indice de nutrition phosphatée	indice di nutrizione P	Phosphorgehaltsindex
indice de nutrition potassique	indice di nutrizione K	Kaliumgehaltsindex
indices de nutrition phosphatée et potassique	indici di nutrizione P e K	Phosphor- und Kaliumversorgungsindizes
ingestion journalière	consumo giornaliero di foraggio (bestiame)	Verzehr, täglicher
intensité d'utilisation	intensità di sfruttamento	Nutzungsintensität
intensité d'utilisation/d'exploitation	intensità di gestione	Bewirtschaftungsintensität
légumineuses à grains	leguminose da granella	Körnerleguminosen
lessivage, lixiviation	dilavamento	Auswaschung
lié au sol	tellurico	bodenbürtig

liste des intrants	lista dei mezzi di produzione autorizzati	Betriebsmittelliste
lixiviation, percolation	percolazione	Versickerung
matière azotée (MA)	proteina grezza (PG)	Rohprotein (RP)
matière organique	sostanza organica	organisches Material
matière organique du sol	sostanza organica del suolo	Bodensubstanz, organische
matière sèche (MS)	sostanza secca (SS)	Trockensubstanz (TS)
mesures d'assainissement	misure di risanamento	Sanierungsmaßnahmen
méthode du bilan prévisionnel	metodo del bilancio previsionale	Methode der prognostizierten Bilanz
micro-éléments	microelementi, oligoelementi	Mikronährstoffe (Spurenelemente)
migration en argile	migrazione dell'argilla	Tonverlagerung
mode d'utilisation	tipo di sfruttamento	Nutzungsart
nitrate d'ammonium	nitrate ammonico	Ammonsalpeter
niveau d'approvisionnement	livello (grado) d'approvvigionamento	Versorgungsstufe
niveau de fertilité du sol	stato nutrizionale del suolo	Nährstoffversorgungsstufe des Bodens
noircissement interne	cuore nero	Schwarzfleckigkeit
nombre standard d'utilisations	numero di sfruttamenti standard	Nutzungen, übliche Anzahl
normes de fumure, normes de fertilisation	norma di concimazione	Düngungsnormen
nutrition soufrée	nutrizione sulfurea	Schwefelversorgung
objectif de rendement	obiettivo di resa	Ertragsziel
part de squelette	scheletro	Skelettgehalt
pâturage	pascolo	Weide
pâturage continu sur gazon court	pascolo continuo a cotico basso	Kurzrasenweiden
pénétration des racines	penetrazione delle radici	Durchwurzelbarkeit
PER (Prestations écologiques requises)	PER (Prova che le esigenze ecologiche sono rispettate)	ÖLN (ökologischer Leistungsnachweis)
perméabilité à l'eau	permeabilità all'acqua	Wasserdurchlässigkeit
perte d'azote	perdita d'azoto	N-Verlust
perte de sol	perdite di suolo	Bodenschwund
pertes au champ	perdite di foraggio in campo	Feldverluste
pertes de conservation	perdite di conservazione	Lagerungsverluste
phytotoxicité	fitotossicità	Phytotoxizität
pierrosité	percentuale di pietre e ghiaia, scheletro	Steinanteil
place d'animal	posta	Tierplatz
plan d'affouragement	piano di foraggiamento	Fütterungsplan
plan de fumure	piano di concimazione	Düngungsplan
plantation (pommes de terre)	piantagione (patate)	Pflanzung (Kartoffeln)
poids vif	peso vivo	Lebendgewicht
pollution (de l'environnement)	inquinamento (dell'ambiente)	Belastung (Umwelt-)
potentiel de rendement en grain	resa potenziale in granella	Kornertragspotenzial
pouvoir/effet tampon	effetto tampone	Pufferwirkung
prairie	prato	Wiese
prairie à faner	prato da fieno	Heuwiese
prairie de fauche	prato da sfalcio	Mähwiese
prairie de fauche-pâturage	prato-pascolo	Mähweide (gelegentlich beweidete Wiese)
prélèvement	prelievo	Entzug
prélèvements en éléments nutritifs	prelievo di elementi nutritivi	Nährstoffentzug/-entzüge
production d'engrais de ferme	produzione di concimi aziendali	Anfall der Hofdünger
profondeur utile	profondità fisiologica (del suolo), volume di suolo utilizzabile dalle radici	Gründigkeit
profondeur utile du sol	profondità utile del suolo, volume di suolo utilizzabile dalle radici	Gründigkeit, pflanzennutzbare
purinage par tuyaux	tubo di alimentazione flessibile per la distribuzione dei liquami	Gülleverschlachtung
quintal, décitonne (dt)	quintale (q)	Dezitonne (dt)
rampe d'épandage à socs	tubi semirigidi con assolcatore terminale (barra/liquame)	Schleppschuhverteiler

rampe d'épandage à tuyaux souples (pendillards)	tubi flessibili a strascico (barra/liquame)	Schleppschlauchverteiler
rapidité d'action	rapidità d'azione	Wirkungsgeschwindigkeit
ration fourragère	razione foraggera	Futtermation
réaction au travail du sol	lavorabilità del suolo	Bodenbearbeitbarkeit
recommandations de fertilisation	concimazione raccomandata	Düngungsempfehlungen
rendement attendu	aspettativa di resa	Ertragserswartung
rendement en grains	resa in granella	Kornertrag
rendement ingéré	quantità di foraggio consumata dal bestiaime	Ertrag, verzehrter
résidus de récolte	residui colturali	Ernterückstände
résistance aux chocs	resistenza agli urti	Schlagempfindlichkeit
restitutions	restituzioni di sostanze nutritive	Rücklieferung (Nährstoffrücklieferung)
restitutions au pâturage	restituzioni durante il pascolo	Nährstoffrücklieferung bei der Beweidung
rompue (d'une prairie)	dissodamento (di una superficie prativa)	Umbruch (einer Kunstwiese)
rotation	rotazione (pascolo)	Umtrieb
ruissellement	ruscellamento	Abschwemmung
saison de pâture	stagione di pascolo	Weidesaison
saturation	tasso di saturazione in basi (SB)	Basensättigung
semis d'août de prairies temporaires	semina estiva di prati temporanei	Äugstlen
sensibilité au tassement	sensibilità al compattamento (suolo)	Verdichtungsanfälligkeit
seuils de renoncement	soglia di rinuncia	Verzichtsgrenzen
site	sito	Standort
stabilité de la structure	stabilità della struttura (suolo)	Strukturstabilität
stade de développement	stadio di sviluppo	Entwicklungsstadium
statut nutritionnel	stato nutrizionale	Ernährungszustand
structure du sol	struttura del suolo	Bodenstruktur
sulfate de magnésium	solfo di magnesio	Bittersalz
surfertilisation	sovraconcimazione	Überdüngung
surfertilisation en N	sovraconcimazione azotata	N-Übernutzung
symptôme de carence	sintomo di carenza	Mangelercheinung
système de distribution, système d'épandage	sistema di distribuzione	Verteilssystem, Ausbringsystem
système de stabulation	sistema di stabulazione	Aufstallungssystem
tâches blombées	maculatura nera	Blaufleckigkeit
tallage	accestimento	Bestockung
tassement, compactage	compattamento del suolo	Bodenverdichtung
technique d'épandage	tecnica di distribuzione	Ausbringtechnik
teneur azotée, teneur en azote	tenore in azoto	Stickstoffgehalt
teneur en amidon	tenore in amido	Stärkegehalt
teneur en argile	tenore in argilla	Tongehalt
teneur en chaux	tenore in calcare	Kalkanteil
teneur en éléments nutritifs	tenore in elementi nutritivi	Nährstoffgehalt
teneur en humus	tenore in humus	Humusgehalt
teneur en matière sèche	tenore in sostanza secca	Trockensubstanzgehalt
teneur en phosphore	tenore in fosforo	Phosphorgehalt
teneur en potassium	tenore in potassio	Kaliumgehalt
texture du sol	tessitura del suolo	Bodentextur
tolérance à la chaux	tolleranza al calcare	Kalkverträglichkeit
traitement des engrais de ferme	preparazione dei concimi aziendali	Hofdüngeraufbereitung
type de sol	tipo di suolo	Bodenart
valeur critique	valore critico	Wert, kritischer
valeurs indicatives	valori di riferimento	Richtwerte
valeurs seuils	valori soglia	Schwellenwerte
verger	frutteto	Obstanlage
verger haute tige	frutteto ad alto fusto	Feldobstbau (-anlage)
volatilisation d'ammoniac (NH <sub>3</sub> )	volatilizzazione dell'ammoniaca (NH <sub>3</sub> )	Ammoniakverflüchtigung (NH <sub>3</sub> )

## Annexe 5. Autrices et auteurs

Ançay André  
Agroscope  
Route des Eterpys 18, 1964 Conthey, Suisse  
Tél. +41 (0)58 481 35 50  
andre.ancay@agroscope.admin.ch

Anken Thomas  
Agroscope  
Tänikon 1, 8356 Ettenhausen, Suisse  
Tél. +41 (0)58 480 33 52  
thomas.anken@agroscope.admin.ch

Baux Alice  
Agroscope  
Route de Duillier 50, c.p. 1012, 1260 Nyon 1, Suisse  
Tél. +41 (0)58 460 47 22  
alice.baux@agroscope.admin.ch

Blanchet Guillaume  
Agroscope  
Route de Duillier 50, c.p. 1012, 1260 Nyon 1, Suisse  
Tél. +41 (0)58 460 46 58

Bretscher Daniel  
Agroscope  
Reckenholzstrasse 191, 8046 Zurich, Suisse  
Tél. +41 (0)58 468 75 20  
daniel.bretscher@agroscope.admin.ch

Cadot Selma  
Agroscope  
Reckenholzstrasse 191, 8046 Zurich, Suisse  
Tél. +41 (0)58 460 50 07  
selma.cadot@agroscope.admin.ch

Carlen Christoph  
Agroscope  
Route des Eterpys 18, 1964 Conthey, Suisse  
Tél. +41 (0)58 481 35 13  
christoph.carlen@agroscope.admin.ch

Carron Claude-Alain  
Agroscope  
Route des Eterpys 18, 1964 Conthey, Suisse  
Tél. +41 (0)58 481 35 39  
claude-alain.carron@agroscope.admin.ch

Charles Raphaël  
Institut de recherche de l'agriculture biologique FiBL  
Avenue des Jordils 3, CP 1080, 1001 Lausanne, Suisse  
Tél. +41 (0)21 619 44 77  
raphael.charles@fibl.org

Dupuis Brice  
Agroscope  
Route de Duillier 50, c.p. 1012, 1260 Nyon 1, Suisse  
Tél. +41 (0)58 460 47 48  
brice.dupuis@agroscope.admin.ch

Eicher Othmar  
Landwirtschaftliches Zentrum Liebegg, Obstbau  
Liebegg 1, 5722 Gränichen, Suisse  
Tél. +41 (0)62 855 86 39  
othmar.eicher@ag.ch

Flisch René  
Agroscope  
Reckenholzstrasse 191, 8046 Zurich, Suisse  
Tél. +41 (0)58 468 73 23  
rene.flisch@agroscope.admin.ch

Gilli Céline  
Agroscope  
Route des Eterpys 18, 1964 Conthey, Suisse  
Tél. +41 (0)58 481 35 19  
celine.gilli@agroscope.admin.ch

Hiltbrunner Jürg  
Agroscope  
Reckenholzstrasse 191, 8046 Zurich, Suisse  
Tél. +41 (0)58 468 73 57  
juerg.hiltbrunner@agroscope.admin.ch

Huguenin-Elie Olivier  
Agroscope  
Reckenholzstrasse 191, 8046 Zurich, Suisse  
Tél. +41 (0)58 468 72 42  
olivier.huguenin@agroscope.admin.ch

Jeangros Bernard  
Agroscope  
Route de Duillier 50, c.p. 1012, 1260 Nyon 1, Suisse  
Tél. +41 (0)58 460 47 38  
bernard.jeangros@agroscope.admin.ch

Kessler Willy  
Agroscope  
Schloss 1, case postale, 8820 Wädenswil, Suisse  
Tél. +41 (0)58 468 72 76  
willy.kessler@agroscope.admin.ch

Krauss Jürgen  
Agroscope  
Schloss 1, case postale, 8820 Wädenswil, Suisse  
Tél. +41 (0)58 460 62 84  
juergen.krauss@agroscope.admin.ch

Kuster Thomas  
Agroscope  
Schloss 1, case postale, 8820 Wädenswil, Suisse  
Tél. +41 (0)58 460 62 43  
thomas.kuster@agroscope.admin.ch

Latsch Annett  
Agroscope  
Tänikon 1, 8356 Ettenhausen, Suisse  
Tél. +41 (0)58 480 33 31  
annett.latsch@agroscope.admin.ch

Leumann Lucie  
Ökohum GmbH  
Tobelbachstrasse 8, 8585 Herrenhof, Suisse  
Tél. +41 (0)71 680 00 70  
leumann@oekohum.ch

Levy Lilia  
Agroscope  
Route de Duillier 50, c.p. 1012, 1260 Nyon 1, Suisse  
Tél. +41 (0)58 460 47 18  
lilia.levi@agroscope.admin.ch

Lüscher Andreas  
Agroscope  
Reckenholzstrasse 191, 8046 Zurich, Suisse  
Tél. +41 (0)58 468 72 73  
andreas.luescher@agroscope.admin.ch

Mayer Jochen  
Agroscope  
Reckenholzstrasse 191, 8046 Zurich, Suisse  
Tél. +41 (0)58 468 72 14  
jochen.mayer@agroscope.admin.ch

Menzi Harald  
Agroscope  
Rte de la Tioleyre 4, c. p. 64, 1725 Posieux, Suisse  
Tél. +41 (0)58 467 54 80  
harald.menzi@agroscope.admin.ch

Mosimann Eric  
Agroscope  
Route de Duillier 50, c. p. 1012, 1260 Nyon 1, Suisse  
Tél. +41 (0)58 460 47 36  
eric.mosimann@agroscope.admin.ch

Müller Urs  
BBZ Bildungs- und Beratungszentrum Arenenberg  
Arenenberg 1, 8268 Salenstein, Suisse  
Tél. +41 (0)71 663 33 04  
urs.mueller@tg.ch

Neuweiler Reto  
Agroscope  
Schloss 1, c. p., 8820 Wädenswil, Suisse  
Tél. +41 (0)58 460 64 53  
reto.neuweiler@agroscope.admin.ch

Oberholzer Hansrudolf  
Agroscope  
Reckenholzstrasse 191, 8046 Zurich, Suisse  
Tél. +41 (0)58 468 72 97  
hansrudolf.oberholzer@agroscope.admin.ch

Pellet Didier  
Agroscope  
Route de Duillier 50, c. p. 1012, 1260 Nyon 1, Suisse  
Tél. +41 (0)58 460 47 16  
didier.pellet@agroscope.admin.ch

Poffet Josef  
JardinSuisse  
Bahnhofstrasse 94, 5000 Aarau, Suisse  
Tél. +41 (0)44 388 53 36  
j.poffet@jardinsuisse.ch

Poulet Jeanne  
Union fruitière lémanique  
Avenue de Marcelin 2, 1110 Morges, Suisse  
Tél. +41 (0)21 802 28 42  
info@ufl.ch

Prasuhn Volker  
Agroscope  
Reckenholzstrasse 191, 8046 Zurich, Suisse  
Tél. +41 (0)58 468 71 45  
volker.prasuhn@agroscope.admin.ch

Richner Walter  
Agroscope  
Reckenholzstrasse 191, 8046 Zurich, Suisse  
Tél. +41 (0)58 468 71 65  
walter.richner@agroscope.admin.ch

Rutishauser Reto  
Ökohum GmbH  
Tobelbachstrasse 8, 8585 Herrenhof, Suisse  
Tél. +41 (0)71 680 00 70  
rutishauser@oekohum.ch

Sauter Joachim  
Rüttihubelstrasse 561, 3077 Enggistein, Suisse  
gerd-joachim.sauter@bluewin.ch

Schlegel Patrick  
Agroscope  
Rte de la Tioleyre 4, c. p. 64, 1725 Posieux, Suisse  
Tél. +41 (0)58 466 72 75  
patrick.schlegel@agroscope.admin.ch

Sinaj Sokrat  
Agroscope  
Route de Duillier 50, c. p. 1012, 1260 Nyon 1, Suisse  
Tél. +41 (0)58 460 46 58  
sokrat.sinaj@agroscope.admin.ch

Spring Jean-Laurent  
Agroscope  
Centre de recherche de Pully  
Avenue Rochettaz 21, 1009 Pully, Suisse  
Tél. +41 (0)58 468 65 63  
jean-laurent.spring@agroscope.admin.ch

Verdenal Thibaut  
Agroscope  
Centre de recherche de Pully  
Avenue Rochettaz 21, 1009 Pully, Suisse  
Tél. +41 (0)58 468 65 61  
thibaut.verdenal@agroscope.admin.ch

Wegmüller Hans Peter  
Hauert HBG Dünger AG  
Dorfstrasse 12, 3257 Grossaffoltern, Suisse  
Tél. +41 (0)32 389 10 10  
labor@hauert.com

Wolz Regula  
Agroscope  
Schwarzenburgstrasse 161, 3003 Berne, Suisse  
Tél. +41 (0)58 480 32 79  
regula.wolz@agroscope.admin.ch

Zähner Michael  
Agroscope  
Tänikon 1, 8356 Ettenhausen, Suisse  
Tél. +41 (0)58 480 33 13  
michael.zaehner@agroscope.admin.ch

## Annexe 6. Coordinateurs



Sokrat Sinaj, né en 1956, a étudié l'agronomie à l'*Université d'Agriculture de Tirana* en Albanie. Après un doctorat à l'*Institut National Polytechnique de Lorraine* à Nancy (F) en 1993, il a travaillé pendant deux ans comme post-doc au *Centre de pédologie biologique* à Nancy (F). Il a ensuite été senior scientist pendant onze ans dans le groupe de nutrition

des plantes à l'EPF de Zurich. En 2005, il a obtenu le titre de professeur des universités. Sokrat Sinaj a rejoint Agroscope en septembre 2007. L'objectif principal de la recherche qu'il mène avec son équipe est double. Il s'agit d'une part de comprendre les processus et les facteurs gouvernant les flux des éléments nutritifs dans les agrosystèmes, et d'autre part de fournir les bases scientifiques permettant leur gestion intégrée et efficiente, indispensable pour des systèmes agraires productifs et durables. Sokrat Sinaj a publié plus de 100 articles dans des revues scientifiques internationales.



Walter Richner, né en 1963, a effectué des études d'agronomie dans le domaine des sciences végétales à l'EPF de Zurich où il a obtenu son doctorat en 1992. Après un post-doc à la *Michigan State University*, il a travaillé comme maître-assistant dans le groupe Grandes cultures et sélection végétale de l'EPF de Zurich de 1994 à 2001. Depuis 2001, il dirige

le groupe de recherche Protection des eaux et flux des substances à Agroscope, groupe qui s'occupe d'améliorer la gestion des éléments nutritifs dans l'agriculture et de réduire les pertes d'éléments nutritifs dans les eaux. Sur mandat de l'Office fédéral de l'agriculture, le groupe de recherche gère le «Dépouillement centralisé des indicateurs agro-environnementaux» et établit des bases scientifiques pour l'exécution de mesures de politique agricole, notamment dans le domaine du bilan des nutriments et de l'homologation des engrais. Walter Richner est chargé de cours dans le Département des sciences des systèmes environnementaux à l'EPF de Zurich.



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'économie,  
de la formation et de la recherche DEFR  
**Agroscope**