



13/ Fertilisation en arboriculture

Thomas Kuster¹, Othmar Eicher², Lucie Leumann³, Urs Müller⁴,
Jeanne Poulet⁵ et Reto Rutishauser³

¹ Agroscope, 8820 Wädenswil, Suisse

² Landwirtschaftliches Zentrum Liebegg, 5722 Gränichen, Suisse

³ Ökohum, 8585 Herrenhof, Suisse

⁴ BBZ Bildungs- und Beratungszentrum Arenenberg, 8268 Salenstein, Suisse

⁵ Union fruitière lémanique, 1110 Morges, Suisse

Renseignements: 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 nutritifs 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/m²).

Culture	Rendement (kg/m ²)	N	P ₂ O ₅	P	K ₂ 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)¹.

	N	P ₂ O ₅	P	K ₂ 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

¹ 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 ¹	élevé:	-10	suffisant:	0	bas:	+10

¹ 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 ¹	élevé:	-12	suffisant:	0	bas:	+9

¹ 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 ¹	X	X	élevé	-10 %	suffisant	0 %	bas	+10 %

¹ 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 ¹	P, K, Mg (extraits H ₂ O10 et AAE10)	tous les 5–10 ans ²
	matière organique (évaluation échelle couleurs)	tous les 5–10 ans ²
	pH (dans H ₂ O)	tous les 5–10 ans ²
	granulométrie/teneur d'argile (évaluation sensorielle)	une seule fois
Recommandé ³	oligo-éléments (B, Fe, Mn, Zn)	tous les 5–10 ans ²
	matière organique (analysée)	tous les 5–10 ans ²
	granulométrie/teneur d'argile (analysées)	une seule fois
	capacité d'échange de cations	une seule fois
	saturation	une seule fois

¹ 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).

² Plus fréquemment dans les exploitations commerciales présentant des difficultés dans les cultures ou des problèmes de qualité.

³ 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-

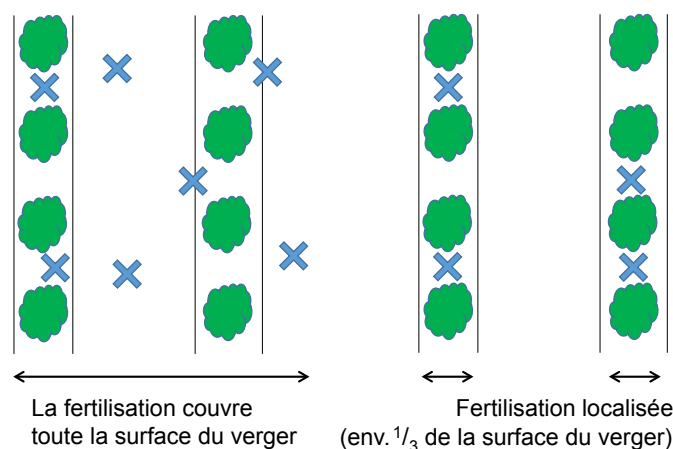


Figure 1. Schéma de prélèvement d'échantillons de sol (x), dans le cas où l'engrais est distribué sur toute la parcelle (à gauche) ou lorsque l'engrais est apporté localement sur des terrasses ou sur les lignes (à droite).



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_2O_{10}) 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_2O_{10} .

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_2O_{10} 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_2O_{10} 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_2O_{10} . 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_2O_{10}) : 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/m² 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 ₂ O ₅	P	K ₂ O	K	Mg
Sol	Facteur de correction extrait H ₂ O10 ¹	13–15 ³		1,4	1,4	0,6	0,6	1,4
	Facteur de correction extrait AAE10 ²	16–18 ³		1,0	1,0	0,4	0,4	1,4
	Facteur de correction global pour ce sol ⁴			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 ²	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 %
	Norme de fertilisation corrigée⁵		60,0	24,0	10,4	45,0	37,4	30,0

¹ Éléments nutritifs dans l'extrait H₂O10: 3 mg P/kg, 55 mg K/kg, 7 mg Mg/kg; teneur en argile: 22 %.

² Éléments nutritifs dans l'extrait AAE10: 46 mg P/kg, 330 mg K/kg, 40 mg Mg/kg; teneur en argile: 22 %.

³ Dans le module 2.

⁴ Mode de calcul: (2 x facteur extrait AAE10 + 1 x facteur extrait H₂O10) : 3. Arrondir ensuite la valeur obtenue au chiffre après la virgule.

⁵ 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-

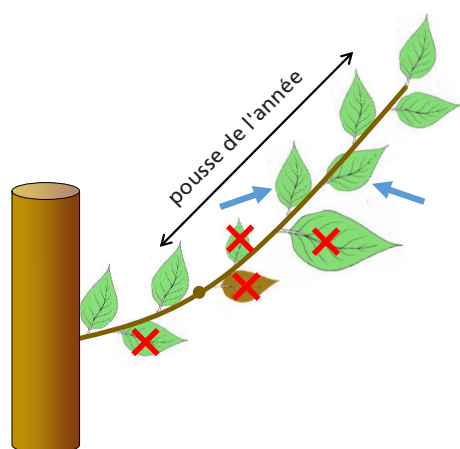


Figure 3. Pour l'analyse des feuilles, prélever au maximum deux feuilles par arbre, chacune au milieu d'une pousse de l'année (→). Les feuilles qui ne sont pas représentatives de l'arbre (ou du verger) quant à la forme, à la couleur ou à l'angle d'insertion, ne doivent pas être utilisées (X).

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 (%) ¹	P (%) ¹	K (%) ¹	Ca (%) ¹	Mg (%) ¹	B (mg/kg) ²	Cu (mg/kg) ²	Fe (mg/kg) ²	Mn (mg/kg) ²	Zn (mg/kg) ²
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: ¹ Bertschinger et al. (2003), ² 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).¹

	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 ²										
B			Chélate ²									
Fe			Chélate ²									
Mn			Chélate ²									
Engrais foliaires ³												
N							FN		FP			
Ca												
Mg												
B												
Fe												
Mn												
Zn							FN		FP			

¹ 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.

² 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.

³ 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) ou du CVIS (Inspectorat suisse du compostage et de la méthanisation, 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 m³ 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 m³ 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 P₂O₅, 0,56 kg K₂O et 0,08 kg Mg) ou selon le rendement annuel de fruits (1,5 kg N, 0,5 kg P₂O₅, 1,8 kg K₂O 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 P₂O₅, 300 kg K₂O 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 m³ 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 m² 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 [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 [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

