



## 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	–	–	–	–
Maïs 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