

Publication spéciale / 2023



10/ Fertilisation des cultures maraîchères

Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF 2023) – Chapitre 10

Édition 2023

Auteurs

Torsten Schöneberg, Frank Liebisch



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'économie,
de la formation et de la recherche DEFR
Agroscope

Remerciements

Nous remercions les personnes suivantes pour les corrections apportées et les précieuses suggestions de modification:

Irene Weyermann (AGRIDEA)

Wolf Bischoff (TerrAquat)

Martin Freund (Inforama)

Reto Neuweiler (Agroscope)

Impressum

Éditeur	Agroscope Müller-Thurgau-Strasse 29 8820 Wädenswil www.agroscope.ch
Renseignements	Torsten Schöneberg, torsten.schoeneberg@agroscope.admin.ch
Traduction	Service linguistique Agroscope
Photo de couverture	Johann Marmy
Édition	2 ^e édition révisée 2023 (1 ^{re} édition publiée dans l'édition complète PRIF 2017); voir également Chronique des bases de fertilisation: Historique des PRIF
Download	www.prif.ch
Copyright	© Agroscope 2023
DOI	https://doi.org/10.34776/prif23-10

Exclusion de responsabilité

Les informations contenues dans cette publication sont destinées uniquement à l'information des lectrices et lecteurs. Agroscope s'efforce de fournir des informations correctes, actuelles et complètes, mais décline toute responsabilité à cet égard. Nous déclinons toute responsabilité pour d'éventuels dommages en lien avec la mise en œuvre des informations contenues dans les publications. Les lois et dispositions légales en vigueur en Suisse s'appliquent aux lectrices et lecteurs; la jurisprudence actuelle est applicable.

Sommaire

1	Introduction.....	4
2	Besoins en éléments minéraux des différentes espèces de légumes.....	5
3	Fertilisation azotée	10
3.1	Optimisation de l'efficacité de l'azote	10
3.2	Dosage de la fertilisation azotée selon l'analyse N _{min}	11
3.3	Fertilisation azotée basée sur l'analyse de sève.....	16
3.4	Fertilisation azotée à l'aide de mesures numériques	16
3.5	Conservation de l'azote résiduel à l'automne	17
4	Fertilisation en soufre	17
4.1	Carence en soufre	17
4.2	Besoins en soufre des cultures maraîchères	17
4.3	Application d'engrais contenant du soufre	18
5	Rôle de l'approvisionnement en oligo-éléments	18
6	Symptômes de carence en éléments nutritifs.....	20
7	Fertilisation foliaire	21
8	Utilisation d'engrais de recyclage	22
9	Conclusion	22
10	Bibliographie.....	23
11	Liste des tableaux	25

1 Introduction

Dans les cultures maraîchères, une fertilisation répondant aux besoins des cultures constitue la base d'une production durable de légumes de première qualité, une légère carence en éléments nutritifs pouvant souvent rendre la marchandise invendable (Feller et al., 2022). Il est donc essentiel que chaque élément nutritif soit disponible en quantité optimale tout au long de la culture pour répondre aux exigences de qualité du commerce ainsi que des consommatrices et consommateurs (Neuweiler et al., 2008). Par conséquent, un but essentiel de la fertilisation est de remplacer les éléments nutritifs soustraits au sol et exportés avec les récoltes ainsi que les pertes d'éléments nutritifs d'autre nature.

Outre la multiplication de troubles physiologiques, certains éléments nutritifs en excès peuvent favoriser l'apparition de maladies végétales (Bergmann, 1993; Huber & Haneklaus, 2007; Spann & Schumann, 2010) et causer des problèmes écologiques considérables (Guntern et al., 2020). 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 d'azote disponible dans le sol dans la dernière phase de la culture d'oignons, la maturation de ces derniers est retardée. On constate également une occurrence augmentée de l'épaississement du collet (Crüger, 1982; Lichtenhahn et al., 2003).

Chez les légumes feuilles et les légumes tiges, une alimentation azotée riche entraîne une augmentation de la teneur en nitrates dans le produit récolté (Vogel et al., 1996). Celle-ci peut dépasser les valeurs tolérées, surtout dans les périodes de faible éclaircissement naturel au printemps et en automne (Wonneberger et al., 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) (Holtzschulze, 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) (Feller et al., 2022; Liebisch et al., 2009; Taylor & Locascio, 2004).

2 Besoins en éléments minéraux des différentes espèces de légumes

Les besoins bruts en azote (N), phosphore (P), potassium (K) et magnésium (Mg) (tabl. 1a et 1b) correspondent aux éléments exportés par des cultures donnant des rendements optimaux en légumes de qualité. De la récolte à la mise sur le marché des légumes en passant par leur conditionnement, les différentes opérations laissent des quantités variables de résidus qui, dans les cultures de plein champ, restent généralement sur la parcelle. 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 en dehors de la période de végétation, les cultures suivantes ne peuvent pas utiliser totalement cet azote disponible comme on pouvait s'y attendre. En Suisse, on estime actuellement la part d'azote utilisée à 20 % (= $N_{\text{imputable}}$). Les éléments nutritifs fournis par le sol sont également pris en compte dans les besoins bruts en azote.

Les besoins nets en éléments nutritifs correspondent aux quantités exportées avec les récoltes. Elles doivent être remplacées. Pour P, K et Mg, ces besoins sont calculés d'après les besoins bruts moins les teneurs des résidus de récolte restés au champ. Le tableau 1a et l'ordonnance allemande sur la fertilisation fournissent des indications sur la quantité d'azote contenue dans les résidus de récolte susceptible d'être prise en compte (Düngeverordnung, DüV, 2017; tabl. 4, p. 26 et ss.). Contrairement à ce qui se passe en Suisse, en Allemagne, il est possible de prendre en compte jusqu'à 70 % de l'azote disponible contenu dans les résidus de récolte dans le calcul des besoins nets en azote (Feller et al., 2011; Krug, 1991). Il reste à vérifier dans quelle mesure ces données peuvent être appliquées aux sols suisses.

La prise en compte du dégagement de l'azote contenu dans le sol pour le calcul des besoins nets en éléments nutritifs fait également partie aujourd'hui des bonnes pratiques maraîchères (Krug, 1991). Les méthodes utilisées aujourd'hui sont des méthodes d'estimation ou des analyses N_{min} basées sur des échantillons de sol. 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 sol (PRIF 2017, module «Caractéristiques et analyses de sol», chapitre 4, Flisch et al., 2017). Les éléments nutritifs contenus dans les résidus de récolte de la culture précédente sont déduits (tabl. 1a). 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 sol. Pour le calcul simplifié de Suisse-Bilanz, on utilise comme norme les valeurs de besoins nets basées sur des analyses de sol.

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}). (Agroscope, 2020c, 2020a). Il faut tenir compte des propriétés du sol dans le choix de la méthode d'analyse (Flisch et al., 2017, chapitre 4).

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 de correction basés sur les résultats de l'analyse par la méthode de l'acétate d'ammonium (1x) et des facteurs de correction de l'analyse par la méthode de l'extrait à l'eau (2x) (Gysi et al., 2002).

$$\text{Facteur global de correction} = \frac{(1 * \text{facteur de correction AAE10} + 2 * \text{facteur de correction H2O10})}{3}$$

La fertilisation azotée peut être optimisée en prenant en compte le niveau actuel de N_{disp} . Outre les méthodes d'estimation, les analyses de sol N_{min} fournissent des bases permettant de prendre en compte l'assimilabilité momentanée de N dans l'environnement des racines (Agroscope, 2020d, 2020b).

Tableau 1a: Besoins bruts en éléments nutritifs, teneurs en éléments nutritifs des résidus de récolte et besoins nets en éléments nutritifs de diverses cultures maraîchères de plein champ (Neuweiler & Krauss, 2017).

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 sur la base des analyses de sol				Teneurs 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 ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg	N disp.	N impu.**	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg	N	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg
Brassicacées														
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
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
Chou palmier	300	270	34.9 (80)	215.8 (260)	20	90	20	13.1 (30)	83 (100)	10	250	21.8 (50)	132.8 (160)	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/m²	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/m²	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)	207.5 (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
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
Astéracées														
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, Cichorino 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

Culture: légumes de plein champ	Rendement (kg/a)	Besoins bruts en éléments nutritifs (kg/ha) = norme pour le calcul de la fertilisation P, K et Mg sur la base des analyses de sol				Teneurs 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 ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg	N disp.	N impu.	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg	N	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg
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
Apiacées														
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
Panais	400	200	52.3 (120)	340.2 (410)	35	100	20	13.1 (30)	99.6 (120)	10	180	40.3 (90)	240.7 (290)	25
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
Chénopodiacées														
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
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
Fabacées														
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, transformation	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

Culture: légumes de plein champ	Rendement (kg/a)	Besoins bruts en éléments nutritifs (kg/ha) = norme pour le calcul de la fertilisation P, K et Mg sur la base des analyses de sol				Teneurs 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 ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg	N disp ^a	N impu. ^{**}	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg	N	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg
Engrais verts fabacées	300	0	0	0	0	50	0	8.7 (20)	41.5 (50)	10	0	0	0	0
Cucurbitacées														
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
Solanacées														
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 ^a	800	130	21.8 (50)	215.8 (260)	30	0	0	0	0	0	130	21.8 (50)	215.8 (260)	30
Liliacées														
Ail	200	130	20.1 (45)	166 (200)	20	70	10	6.7 (15)	66.4 (80)	10	120	13.4 (30)	99.6 (120)	10
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 ^a	50	140	13.1 (30)	107.9 (130)	20	0	0	0	0	0	140	13.1 (30)	107.9 (130)	20
Asperge verte ^a	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
Divers														
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
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
Valeur moyenne légumes de plein champ ***		130	19.6 (45)	153.5 (185)	25	50	10	6.5 (15)	53.9 (65)	10	120	13.1 (30)	99.6 (120)	15

^a Les résidus de récolte sont en général évacués.

^{*} L'azote contenu dans les résidus de récolte est disponible à environ 80 % pour les cultures suivantes, selon le légume (= N_{disponible}).

^{**} En raison des pertes potentielles d'azote, les cultures suivantes ne peuvent utiliser le N_{disponible} qu'à hauteur d'environ 20 % (= N_{imputable}).

^{***} Les moyennes sont indiquées uniquement à titre d'orientation pour les cultures de plein champ pour lesquelles on ne dispose pas de données concernant la norme de fertilisation.

Comme il ne s'agit pas de moyennes pondérées, elles doivent être considérées comme des lignes directrices et non comme des recommandations de fertilisation.

Tableau 1b: Besoins bruts et besoins nets en éléments nutritifs de diverses cultures maraîchères sous serre et tunnel (Neuweiler & Krauss, 2017).

Culture: légumes de serre et de tunnel haut	Rendement (kg/a)	Besoins bruts en éléments nutritifs (kg/ha) = norme pour le calcul de la fertilisation P, K et Mg- sur la base des analyses de sol				Besoins nets en éléments nutritifs (kg/ha) = norme pour le calcul simplifié de Suisse-Bilanz			
		N	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg	N	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg
Aubergine, culture en sol	900	200	43.6 (100)	290.5 (350)	50	200	43.6 (100)	290.5 (350)	50
Haricot à rames - ^a	500	0-40	34.9 (80)	149.4 (180)	30	40	34.9 (80)	149.4 (180)	30
Scarole d'automne	450	140	21.8 (50)	149.4 (180)	30	140	21.8 (50)	149.4 (180)	30
Concombre, culture en sol, 30 pces/m ²	1500	200	43.6 (100)	249 (300)	60	200	43.6 (100)	249 (300)	60
Concombre, culture en sol, 50 pces/m ²	2500	300	65.4 (150)	332 (400)	80	300	65.4 (150)	332 (400)	80
Chou-pomme	450	140	26.2 (60)	166 (200)	30	140	26.2 (60)	166 (200)	30
Côte de bette	900	200	43.6 (100)	332 (400)	50	200	43.6 (100)	332 (400)	50
Cresson ^a	130	20	4.4 (10)	24.9 (30)	10	20	4.4 (10)	24.9 (30)	10
Poireau	500	160	26.2 (60)	182.6 (220)	30	160	26.2 (60)	182.6 (220)	30
Mâche ^a	120	50	4.4 (10)	49.8 (60)	10	50	4.4 (10)	49.8 (60)	10
Poivron, culture en sol	600	160	21.8 (50)	207.5 (250)	30	160	21.8 (50)	207.5 (250)	30
Persil	300	100	21.8 (50)	149.4 (180)	20	100	21.8 (50)	149.4 (180)	20
Pourpier	150	70	8.7 (20)	74.7 (90)	20	70	8.7 (20)	74.7 (90)	20
Radis, 20 bottes/m ² ^a	400	60	13.1 (30)	83 (100)	20	60	13.1 (30)	83 (100)	20
Radis long, 18 pces/m ²	600	90	21.8 (50)	166 (200)	30	90	21.8 (50)	166 (200)	30
Roquette, une coupe	200	150	13.1 (30)	124.5 (150)	10	150	13.1 (30)	124.5 (150)	10
Roquette, deux coupes	300	210	17.5 (40)	149.4 (180)	20	210	17.5 (40)	149.4 (180)	20
Salade pommée, iceberg, lollo	400	80	13.1 (30)	116.2 (140)	20	80	13.1 (30)	116.2 (140)	20
Ciboulette (une culture) ^c	300	100	17.5 (40)	149.4 (180)	30	100	17.5 (40)	149.4 (180)	30
Laitue à tondre	150	50	4.4 (10)	41.5 (50)	10	50	4.4 (10)	41.5 (50)	10
Céleri à soupe, 40 pces//m ²	600	120	30.5 (70)	182.6 (220)	30	120	30.5 (70)	182.6 (220)	30
Épinard	120	100	13.1 (30)	116.2 (140)	20	100	13.1 (30)	116.2 (140)	20
Tomate, culture en sol	1200	170	34.9 (80)	282.2 (340)	60	170	34.9 (80)	282.2 (340)	60
Tomate, culture en sol	1800	250	43.6 (100)	415 (500)	80	250	43.6 (100)	415 (500)	80
Tomate, culture en sol	2400	330	69.8 (160)	564.4 (680)	120	330	69.8 (160)	564.4 (680)	120
Tomate, culture en sol	3000	400	87.3 (200)	705.4 (850)	150	400	87.3 (200)	705.4 (850)	150
Courgette, pâtisson	600	160	13.1	124.5	10	160	13.1	124.5	10

Culture: légumes de serre et de tunnel haut	Rendement (kg/a)	Besoins bruts en éléments nutritifs (kg/ha) = norme pour le calcul de la fertilisation P, K et Mg- sur la base des analyses de sol				Besoins nets en éléments nutritifs (kg/ha) = norme pour le calcul simplifié de Suisse-Bilanz			
		N	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg	N	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg
			(30)	(150)			(30)	(150)	
Valeur moyenne serre		130	26.2 (60)	182.6 (220)	35	130	26.2 (60)	182.6 (220)	35

- ^a On peut renoncer complètement à une fertilisation azotée après une culture produisant un arrière-effet azoté.
- ^b Si les rendements sont plus élevés, augmenter proportionnellement la fertilisation.
- ^c Forçage de la ciboulette sans ajout de fertilisants.
- * Les moyennes sont indiquées uniquement à titre d'orientation pour les cultures sous serre et tunnel pour lesquelles on ne dispose pas de données concernant la norme de fertilisation. Comme il ne s'agit pas de moyennes pondérées, elles doivent être considérées comme des lignes directrices et non comme des recommandations de fertilisation.

Dans les cultures sous serre ou sous tunnel, il n'y a généralement pas d'incorporation des résidus de récolte et donc pas de récupération des éléments nutritifs, ce qui explique que les besoins nets en éléments nutritifs soient identiques aux besoins bruts. Seule la culture de légumineuses (p. ex. haricots à rames) permet de comptabiliser 40 kg de N/ha dans le Suisse-Bilanz grâce à la fixation de l'azote.

3 Fertilisation azotée

Contrairement aux grandes cultures, la récolte de nombreuses espèces de légumes a lieu à un stade précoce du développement, bien avant que la culture n'arrive véritablement à maturité. Les légumes feuilles, en particulier, sont encore en pleine croissance au moment de la récolte et dépendent donc d'un apport d'azote adapté à leurs besoins jusqu'à la récolte.

3.1 Optimisation de l'efficacité de l'azote

Si les cultures maraîchères nécessitant des éléments nutritifs sont fertilisées en réponse à leurs besoins, des quantités résiduelles d'azote, moyennes à élevées selon le légume, restent dans l'espace racinaire à la fin de la culture. Pour certaines cultures maraîchères, les résidus de récolte laissés sur le champ contiennent en outre des quantités considérables d'azote qui sont ensuite libérées et deviennent alors disponibles pour les plantes (Spiess et al., 2022). Le réapprovisionnement en azote provenant de la culture précédente dépend beaucoup du type et de la quantité de résidus de récolte laissés sur le champ (p. ex. choux-fleurs 77-90 kg de N/ha - durée de minéralisation: 10 semaines ou laitue 9 kg de N/ha - durée de minéralisation: 4 semaines) ainsi que du mode d'enfouissement dans le sol et des conditions météorologiques. En fonction des conditions prédominantes, 20 % à 70 % de l'azote provenant des résidus de récolte peuvent être imputés à la culture suivante (Feller et al., 2011; Neuweiler & Krauss, 2017). Dans de bonnes conditions (sol non détrempé ou compacté), environ 50 % de la quantité totale d'azote provenant des résidus de récolte peuvent être imputés au calcul entre mai et septembre. Dans de très bonnes conditions (enfouissement superficiel des résidus de récolte, temps chaud et humide), jusqu'à 70 % peuvent être imputés au calcul.

Dès que le sol se réchauffe, la minéralisation de la matière organique qu'il contient devient également une source d'azote à ne pas sous-estimer. Alors que pour les premières cultures printanières, l'azote disponible dans le sol reste dans des limites raisonnables, les cultures suivantes disposent de quantités d'azote nettement plus élevées en provenance des cultures précédentes du fait de la minéralisation accélérée par l'augmentation de la température du sol. Celles-ci peuvent être absorbées et utilisées par les cultures maraîchères en développement au même titre que l'azote fraîchement apporté via les engrais. Le fait d'intégrer dans le calcul de la fertilisation les quantités d'azote issues de la minéralisation permet de réduire la quantité d'engrais jusqu'à 15 % selon la culture (Baumgarten, 2008).

Dans un sol chaud et actif, la méthode $N_{\min}$ est très utile pour déterminer l'azote disponible. Différentes analyses $N_{\min}$ réalisées dans le cadre de rotations de cultures maraîchères ont montré que l'azote minéral déjà présent dans le sol peut couvrir une grande partie des besoins des cultures de printemps. D'autres méthodes de mesure basées sur les plantes, comme l'analyse de la sève pour le nitrate, peuvent également fournir de précieuses informations sur l'état d'approvisionnement des cultures en azote. Mais jusqu'à présent, elles ne sont utilisées que sporadiquement dans les cultures maraîchères en Suisse.

3.2 Dosage de la fertilisation azotée selon l'analyse $N_{\min}$

Les tableaux 1a et 1b présentent les données chiffrées des besoins en N des diverses cultures maraîchères. Les maraîchers et maraîchères qui prennent en compte la quantité de N_{disp} déjà présent dans le sol se basent sur les précieuses indications des analyses $N_{\min}$ (Agroscope, 2020d, 2020b, tabl. 2a & 2b). Celles-ci donnent la quantité de N disponible pour les plantes dans le sol à un moment donné (Wonneberger et al., 2004).

L'idéal est de prélever un échantillon juste avant le repiquage ou le semis, ainsi qu'avant chaque fertilisation de couverture (Baumgarten, 2008). La profondeur du prélèvement des échantillons (tabl. 2a & 2b) est déterminée par la profondeur d'enracinement respective des différentes cultures (Gysi et al. 1997; Zemek et al., 2020). 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 prélèvement 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 ou entre 0 et 90 cm (tabl. 2a & 2b). Dans les sols très pierreux, l'échantillonnage à 90 cm peut s'avérer très complexe. L'expérience empirique montre que réduire la profondeur d'échantillonnage de 30 cm n'a souvent que peu d'influence sur l'estimation des besoins en azote (Zemek et al., 2020). Pour disposer d'un échantillonnage représentatif, il faut prélever dans la parcelle au moins douze échantillons répartis en diagonales et les mélanger. Pour une évaluation correcte des paramètres du sol, l'état d'humidité du sol au moment de l'échantillonnage doit autoriser le labour (Baumgarten, 2008).

La méthode $N_{\min}$ ne donne des résultats fiables que si l'on respecte un délai d'au moins quatre semaines à trois mois après la fertilisation organique entre la dernière application de N et la prise d'échantillons (Baumgarten, 2008). Comme le travail du sol stimule la minéralisation de la matière organique et mobilise ainsi l'azote, le prélèvement d'échantillons ne devrait pas être effectué directement après cette opération (Baumgarten, 2008). Afin de réduire les pics de travail et de garantir un prélèvement optimal des échantillons, celui-ci est aujourd'hui souvent délégué à des entreprises spécialisées de travaux agricoles équipées de machines.

Il faut éviter un réchauffement des échantillons $N_{\min}$ déjà au champ en entreposant immédiatement les sachets remplis dans un contenant réfrigéré et en les envoyant ainsi conditionnés. Le matériel d'expédition nécessaire est aujourd'hui généralement mis à disposition par les laboratoires. S'il n'est pas possible d'envoyer les échantillons prélevés directement au laboratoire d'analyse, ils doivent être congelés afin d'empêcher que la minéralisation de N ne se poursuive dans les sachets.

Le résultat de l'analyse permet de calculer la quantité d'azote disponible (kg N/ha) dans l'espace occupé par les racines au moment du prélèvement (Agroscope, 2020b). Cette valeur $N_{\min}$ est comparée à une valeur de référence pour le stade de développement actuel de la culture concernée (tabl. 2a & 2b), permettant ainsi de calculer la quantité de N à ajouter (= différence). L'analyse $N_{\min}$ 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.

$$\text{Dosage de N (kg N/ha)} = N_{\min} (\text{valeur de référence}) - N_{\min}(\text{teneur du sol})$$

Le dosage de N basé sur les échantillons $N_{\min}$ doit être consigné dans Suisse-Bilanz et dans le plan de fertilisation.

Tableau 2a. Fertilisation azotée selon les analyses N_{min} en cultures de légumes de plein champ. Les plannings recommandés d'analyses N_{min} sont surlignés en gris.

Culture (légume de plein champ)	Rendement kg/a	Besoins globaux en N kg N/ha	Profondeur d'échantillonnage ² 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 ¹	2	4	6	8	10	12
Brassicacées										
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	–	–
Cima di rapa	400	170	60	180	160	140	120	100	80	60
Chou palmier	300	270	60	110	290	220	150	70	50	–
Chou précoce sous voile	300	160	60 (90)	120	190	150	100	60	50	50
Chou de garde	500	220	60 (90)	140	240	190	130	60	50	50
Chou à choucroute	800	300	60 (90)	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 ²	300	50	30	90	90	40	40	–	–	–
Radis long, 8-9 pces/m ²	400	120	30 (60)	–	150	120	80	40	–	–
Chou de Bruxelles	250	300	60 (90)	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 (90)	160	140	130	110	80	50	–
Chou frisé, lourd	400	170	60 (90)	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
Astéracées										
Endive, racines	400	80	60 (90)	–	–	80	80	50	50	–
Chicorée rouge, Cicorino rosso, semés	160	120	60	–	160	130	100	80	60	40
Chicorée rouge, Cicorino 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	–
Salades, diverses	350	100	30	100	130	70	40	40	–	–
Salades, diverses	600	120	30 (60)	100	130	70	40	40	–	–
Laitue à tondre	150	60	30	50	80	70	50	30	–	–
Scorsonère	250	130	60 (90)	–	170	170	160	160	150	140

Culture (légume de plein champ)	Rendement	Besoins globaux en N	Profondeur d'échantillonnage ²	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						
	kg/a	kg N/ha	Cm	0 ¹	2	4	6	8	10	12
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
Apiacées										
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 (90)	–	150	150	100	50	30	30
Carotte de garde, de transformation	900	150	60 (90)	–	180	170	120	70	30	30
Panais	400	200	60	–	230	220	170	120	80	50
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
Chénopodiacées										
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 ³	150	110	50	–	–
Épinard, deux coupes	200	160	30	–	160	150	110	110	110	50
Fabacées										
Haricot nain, récolte manuelle	150	0	30 (60)	30	30	30	30	30	–	–
Haricot, transformation	90	0	30 (60)	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	–

Culture (légume de plein champ)	Rendement	Besoins globaux en N	Profondeur d'échantillonnage ²	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						
	kg/a	kg N/ha	Cm	0 ¹	2	4	6	8	10	12
Cucurbitacées										
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
Solanacées										
Aubergine	400	190	60	100	230	200	160	100	70	50
Tomate	800	130	60	100	140	120	100	80	80	50
Liliacées										
Ail	200	130	60	–	80	70	60	50	F	110
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 (90)	E	170	170	170	170	170	170
Asperge verte	25	150	60 (90)	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
Divers										
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 (90)	–	E	170	–	–	–	–
Maïs sucré	180	150	60 (90)	100	190	180	150	110	80	50

– Pas d'analyse N_{min} ni de fertilisation à ce moment.

F Valeur N_{min} au printemps, au début de la végétation.

E Valeur N_{min} 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.

¹ La valeur de référence N_{min} indique en début de culture 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.

² 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. Les valeurs indiquées entre parenthèses se réfèrent à des profondeurs d'échantillonnage pratiquées dans les pays voisins (Zemek et al., 2020). Selon le type de sol, un prélèvement plus profond peut contribuer à une estimation plus précise des besoins en azote de la culture concernée.

³ Semaines après le début de la croissance au printemps.

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 en gris.

Culture Légumes sous serre et tunnel haut	Rendement	Besoins globaux en N	Profondeur d' échantillonnage	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.						
	kg/a	kg N/ha	Cm	Semaine de culture						
				0 ¹	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 ²	1500	200	60	180	170	160	150	140	120	50
Concombre, 50 pces/m ²	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 ²	400	60	30	100	80	60	40	–	–	–
Radis long, 18 pces/m ²	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 ²	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.

¹ La valeur de référence $N_{\min}$ en début de culture montre une teneur suffisante jusqu'à la première fertilisation de couverture. Les analyses de sol $N_{\min}$ en début de culture ne devraient concerner que la profondeur de sol de 0–30 cm.

² 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.

Pour une utilisation optimale de l'engrais par la plante, il est recommandé d'appliquer le produit en plusieurs fois pour les engrais agissant à court et à moyen terme. Cette pratique permet d'éviter les transferts de nitrates dans les couches plus profondes du sol, non utilisables par la plante, et d'adapter la fertilisation au développement de la culture (Lindemann-Zutz et al., 2021). Les besoins en azote dépendent de l'espèce de légume, du rendement visé ainsi que du stade de développement de la plante et de différents facteurs liés au site. Feller et al. (2011) donnent une vue d'ensemble des besoins en azote pendant les différents stades de la culture pour chaque type de légume. En tenant compte des besoins en N et des réserves du sol, il est possible d'appliquer le système KNS de valeurs de référence $N_{\min}$ accompagnant la culture (Lorenz, 1989) afin d'adapter la fertilisation azotée de manière flexible. Une répartition entre fertilisation de fond et fertilisation de couverture peut en outre aider à éviter la pourriture, la montée en graine et des taux de nitrate trop élevés dans la plante.

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.

Les exigences de production et les quantités maximales d'engrais autorisées pour les apports individuels d'autres labels peuvent éventuellement différer et doivent être respectées en conséquence. D'autres informations sont disponibles dans la brochure «Éléments fertilisants et utilisation des engrais dans l'agriculture» (OFEV & OFAG, 2012).

3.3 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 couverture et dans quel ordre de grandeur. Pour cela, les teneurs en nitrate mesurées en ppm (mg/kg de nitrate et par kg de masse fraîche) sont comparées à la valeur de référence de la culture (Neuweiler, 2011). Si la valeur de référence est inférieure de 500 à 1000 ppm, une fertilisation de couverture d'environ 30 kg N/ha est pratiquée, si elle est inférieure de plus de 1000 ppm, l'apport est d'environ 60 kg N/ha (Neuweiler, 2011). La méthode est évaluée dans le cadre d'essais de fertilisation et comparée aux résultats obtenus à l'étranger, afin de permettre une adaptation plus précise à la conduite des cultures à l'avenir.

3.4 Fertilisation azotée à l'aide de mesures numériques

L'analyse $N_{\min}$ d'échantillons de sol permet d'évaluer l'approvisionnement du sol en éléments nutritifs au moment du prélèvement. Cependant, comme l'échantillonnage et l'analyse qui s'ensuit prennent du temps, cette méthode n'est souvent pas adaptée pour prendre des décisions à court terme en matière de fertilisation ou pour tenir compte de la variabilité des sites. L'analyse de la sève, plus rapide, donne des indications sur l'état d'alimentation de la plante, mais pas sur les réserves d'azote dans le sol. Les méthodes de mesure numériques basées sur des capteurs apportent une aide à la décision qui permettra peut-être de combler ces lacunes à l'avenir. Différentes méthodes permettent de faire l'état des lieux en temps réel des éléments nutritifs présents dans le sol et/ou dans la plante et de prévoir et mettre en œuvre des mesures de fertilisation à court terme en les adaptant localement.

En raison de la diversité des cultures maraîchères, peu d'expériences ont encore été faites avec des méthodes de mesure utilisant des capteurs. Les résultats obtenus dans les grandes cultures montrent toutefois qu'une fertilisation adaptée au site sur la base de données relevées à l'aide de capteurs peut réduire les excédents d'azote tout en conservant un rendement équivalent (Grossrieder et al., 2022). Afin de produire des résultats fiables et de faciliter l'introduction de ces techniques dans la pratique, les méthodes de mesure basées sur des capteurs sont constamment améliorées et des études sont menées sur leur mode d'application et leur précision, puis comparées à la méthode $N_{\min}$. Actuellement (état: juin 2023), il n'existe pas encore de méthode numérique basée sur des capteurs pour les cultures maraîchères qui soit suffisamment validée pour fournir des recommandations de fertilisation pour la pratique.

3.5 Conservation de l'azote résiduel à l'automne

Si l'azote déjà présent dans le sol et disponible pour les plantes n'est pas pris en compte lors de l'évaluation de la fertilisation azotée des cultures suivantes, il reste inutilisé et est en général lessivé au plus tard pendant la période de repos végétatif en hiver. A cet égard, les quantités d'azote résiduel les plus menacées sont celles des cultures de légumes feuilles ou de choux qui ont besoin d'azote (p. ex. salades, épinards, choux-fleurs, brocolis), qui ne sont récoltées qu'à la fin de l'été et en automne et qui ne sont pas suivies par d'autres cultures.

Lorsque les cultures maraîchères sont récoltées suffisamment tôt, le moyen le plus efficace de réduire le transfert de nitrates est de semer des cultures d'engrais verts à développement rapide. Les mélanges compatibles avec les semis tardifs ou les céréales telles que l'avoine, qui sont des espèces de couverture consommatrices d'azote, conviennent particulièrement bien, car ils gèlent en hiver et peuvent être enfouis dans le sol au début de la phase de végétation, ce qui permet de mobiliser l'azote. Pour les cultures à récolte tardive qui ne permettent pas la mise en place d'une culture intermédiaire, il est très important de gérer les résidus de récolte. Les déchets de parage issus de la transformation ne devraient pas être directement épandus sur les champs, mais plutôt être utilisés ailleurs, par exemple compostés ou fermentés dans des installations de biogaz. Cette règle est particulièrement vraie dans les régions où les eaux souterraines présentent des problèmes de nitrate.

4 Fertilisation en soufre

La désulfuration obligatoire des fumées a supprimé les apports de soufre atmosphérique, qui permettaient de couvrir la plus grande part des besoins en soufre des cultures maraîchères. Comme cette source de soufre tend à faiblir (Flisch et al., 2009), le soufre lié dans la substance organique du sol et les apports de soufre via les engrais prennent de plus en plus d'importance dans l'approvisionnement des plantes cultivées. 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. Il faut noter que les éléments nutritifs ne sont libérés que lentement et ne sont disponibles qu'à hauteur de 5 à 10 % environ pour la culture au cours de l'année d'application (Becker et al., 2016). La minéralisation de la substance organique libère de l'azote, du phosphore ainsi que du soufre sous forme de sulfate.

4.1 Carence en soufre

Le soufre est impliqué dans divers processus métaboliques, entre autres dans la synthèse de la chlorophylle. Par ailleurs, le soufre 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.

4.2 Besoins en soufre des cultures maraîchères

Les espèces cultivées qui sont de loin les plus exigeantes en soufre sont celles appartenant à la famille des brassicacées (espèces de choux, radis et radis longs, roquette, raifort), avec des prélèvements pouvant atteindre 80 kg de S par ha. Les espèces de la famille des liliacées (oignon, ail, poireau) présentent également des besoins élevés en soufre, de même que les espèces de fabacées (haricot, pois). Par contre, les salades de la famille des astéracées présentent des besoins en soufre comparativement faibles (Bergmann, 1993; Flisch et al., 2017).

En général et comparées aux cultures d'été et d'automne, les cultures précoces ont des exigences plus élevées en matière d'approvisionnement en soufre. Dans les régions soumises à une fréquence moyenne à forte 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 lors de 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 soufre

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 soufre apparaissent principalement au printemps chez les espèces présentant des besoins moyens à élevés en soufre. 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 soufre 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 est recommandé d'utiliser de nouveau des engrais contenant du soufre avant le démarrage de la végétation.

4.3 Application d'engrais contenant du soufre

Divers essais réalisés par Agroscope en cultures précoces d'espèces de légumes exigeantes en soufre montrent que la carence en soufre peut être totalement évitée par l'application des éléments nutritifs principaux P, K et Mg sous la forme d'engrais contenant du sulfate (superphosphate, sulfate de potassium, sulfate de magnésium, etc.) (voir PRIF 2017, module «Propriétés et utilisation des engrais», chapitre 4.2, Richner et al., 2017). D'autre part, on peut aussi utiliser le sulfate d'ammonium ou l'engrais ENTEC®, qui contiennent tous deux du soufre, pour prévenir le manque de cet élément nutritif.

Dans les essais portant sur l'alimentation en soufre du chou-rave précoce, l'application d'une fertilisation de fond contenant du soufre a donné un rendement commercialisable de bulbes avec feuillage pouvant dépasser de 85 % celui d'une fertilisation sans soufre. On a constaté que l'apport de 75 kg de S/ha s'avérait suffisant (Neuweiler, 2013). Si les besoins en P, K et Mg sont couverts avec des engrais contenant du sulfate, les besoins en soufre sont entièrement remplis même pour les espèces de choux très exigeantes. Chez l'épinard d'hiver, on peut généralement éviter totalement les chloroses nuisibles à la qualité par des apports de soufre de l'ordre de 10 kg de 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 (tabl. 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 assimilables 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 (voir PRIF 2017, module «Caractéristiques et analyses de sol», chapitre 5, Flisch et al., 2017).

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 (Odét 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.

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.

6 Symptômes de carence en éléments nutritifs

Dès que l'équilibre nutritionnel de la plante n'est plus assuré, des symptômes de carence apparaissent et donnent l'alerte. Le tableau 4 (Knickmann & Tepe, 1966; Krug, 1991) donne une vue d'ensemble des symptômes de carence les plus frappants pour les différents éléments nutritifs en culture maraîchère. Des descriptions détaillées des carences en éléments nutritifs pour les différentes espèces de légumes sont disponibles dans Zorn et al. (2016) ainsi que dans Wissemeier & Olf (2019).

Tableau 4: Liste des symptômes de carence en éléments nutritifs.

Élément	Symptôme de carence
Azote (N)	Principalement sur les feuilles anciennes, plus tard seulement sur les jeunes feuilles. Croissance faible dans l'ensemble et formation de petites feuilles étroites. Totalité de la feuille atteinte de chlorose, souvent jaune-vert. Choux fréquemment gris-vert, choux rouges, betteraves rouges rouge foncé. Inhibition de la formation des têtes, de l'apparition et de la croissance des fruits.
Phosphore (P)	Principalement sur les feuilles anciennes. Feuilles de couleur vert foncé et forte dépression de la croissance. Selon l'espèce de légumes (p. ex. choux, tomates), reflets rougeâtres et violets sur la face inférieure des feuilles; parfois déformations et frisottis des feuilles. En cas de forte carence, apparition de nécroses ou de colorations brun-rouge.
Potassium (K)	Principalement sur les feuilles anciennes. Coloration bleu-vert fréquente des feuilles (en général plus claire chez les pois et les haricots). La plante semble flasque («flétrie») et les feuilles jaunissent à partir du bord et se dessèchent (nécroses du bord des feuilles). Formation déficiente de la tête et feuilles ondulées pour les salades; enroulement des feuilles pour les haricots et les pois.
Magnésium (Mg)	Principalement sur les feuilles anciennes, plus tard également sur les jeunes feuilles. Jaunissement suivi d'une nécrose, parfois aussi coloration rouge, pourpre ou orange; les nervures des feuilles restent vertes. Les feuilles des choux sont souvent marbrées.
Soufre (S)	Principalement sur les jeunes feuilles. Feuilles vert pâle à jaunes, dans les cas extrêmes, jaunissement des nervures des feuilles.
Calcium (Ca)	Principalement sur les jeunes feuilles. Parties de la plante déformées. Apparition de pourritures apicales (p. ex. tomate, poivrons et piments), de pourritures du collet ou de brûlures internes sur les salades.
Bore (B)	Principalement sur les jeunes éléments de la plante. Déformation des feuilles et croissance rabougrie. Dommages très fréquents au point de végétation de la plante («pourriture du cœur»). Perturbation du développement des fleurs et éclatement de la peau (p. ex. radis, petits radis).
Manganèse (Mn)	Possible sur toute la plante, surtout sur les jeunes feuilles. Chloroses et nécroses ponctuelles; le développement des racines est inhibé.
Fer (Fe)	Principalement sur les jeunes feuilles. Feuilles atteintes de chloroses, presque jaunes, avec des veines vertes.
Molybdène (Mo)	Principalement sur les jeunes feuilles (déformations). Ce sont surtout les crucifères (choux-fleurs, radis, choux blancs, choux-raves) et les légumineuses qui sont sensibles.
Cuivre (Cu)	Principalement sur les jeunes éléments de la plante, plante déformés.
Zinc (Zn)	Selon l'espèce végétale, des chloroses et plus tard des nécroses apparaissent sur les jeunes feuilles et/ou aussi sur les feuilles plus anciennes. Croissance inhibée.

7 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:

- a. Type et formulation de l'élément nutritif
- b. Persistance et répartition de la solution nutritive sur la surface du végétal
- c. 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
- d. 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 et 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 et pour l'assurance qualité.

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. Dans de telles situations, il est recommandé de renoncer à la fertilisation foliaire ou de réduire la concentration du produit. 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.

8 Utilisation d'engrais de recyclage

Parmi les engrais de recyclage, le compost et les digestats solides et liquides prennent de plus en plus d'importance dans les cultures maraîchères de plein champ. Leur application sur les parcelles de culture de légumes est axée non seulement sur l'effet des éléments nutritifs, mais aussi sur 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 (Neuweiler & Heller, 2000), ont montré par ailleurs que le compost peut stimuler les antagonistes microbiens naturels de divers pathogènes transmis par le sol (De Corato, 2020; Grand & Michel, 2020). Lors de l'achat 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 m³/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 (ORRChim 2005, annexe 2.6, chapitre 3.2.2 Compost et digestats).

La limite d'apport d'amendements organiques et organo-minéraux, 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 sur une période de dix ans (ORRChim 2005, annexe 2.6, chapitre 3.2.2 Compost et digestats). Les quantités d'azote et de phosphore qu'ils contiennent doivent également figurer dans le Suisse-Bilanz et être prises en compte dans la quantité totale d'engrais.

Les engrais de ferme et de recyclage doivent être, autant que possible, utilisés dans des cultures autres que maraîchères et précédant ces dernières, et notamment 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.

9 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 ainsi que 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. L'optimisation de la fertilisation grâce à l'utilisation de valeurs de référence $N_{\min}$ accompagnant les cultures ou de logiciels informatiques peut contribuer à augmenter l'efficacité de la fertilisation, sans perte de rendement ni de qualité. Ces mesures permettent d'éviter des apports inutiles d'éléments nutritifs dans l'environnement, d'économiser des coûts de fertilisation et de réduire la charge de travail liée à la documentation.

10 Bibliographie

- Agroscope (2020a). Méthodes de référence des stations de recherche Agroscope – Extraction par l'acétate d'ammonium + EDTA (1:10); version 3.2. <https://ira.agroscope.ch/fr-CH/Page/Publikation/Index/45962>
- Agroscope (2020b). Méthodes de référence des stations de recherche Agroscope – Extraction du NO₃-N et du NH₄-N par le chlorure de calcium 0.01M (1:4) pour déterminer N_{min}; version 1.2. <https://ira.agroscope.ch/fr-CH/Page/Publikation/Index/45978>
- Agroscope (2020c). Méthodes de référence des stations de recherche Agroscope – Extraction de P, K et Mg à l'eau (1:10); version 4.1. <https://ira.agroscope.ch/fr-CH/Page/Publikation/Index/45973>
- Agroscope (2020d). Méthodes de référence des stations de recherche Agroscope – Préparation d'échantillons pour la détermination de N_{min}; version 1.2 (2020). <https://ira.agroscope.ch/fr-CH/Page/Publikation/Index/45984>
- Baumgarten A. (2008). Richtlinien für die sachgerechte Düngung im Garten- und Feldgemüsebau (p. 87). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. <https://info.bml.gv.at/dam/jcr:eb74563c-fc09-4f78-bda2-2f203c4ecc29/RichtlinienfuerdiesachgerechteDuengungimGarten-undFeldgemuesebau.pdf>
- Becker K., Riffel A., Schmidtke K. & Fischinger S. A. (2016). Schwefeldüngung zu Futter- und Körnerleguminosen Empfehlungen für den ökologischen Landbau. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, Bonn.
- Bergmann W. (1993). Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. Gustav Fischer Verlag, Jena, Stuttgart.
- Crüger G. (1982). Pflanzenschutz im Gemüsebau – Handbuch des Erwerbsgärtners. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 422 S.
- De Corato U. (2020). Disease-suppressive compost enhances natural soil suppressiveness against soil-borne plant pathogens: A critical review. Rhizosphere, 13 (100192), 15. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100192>
- DüV (2017). Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen, Pub. L. No. BGBl. I S. 1305, 46. https://www.gesetze-im-internet.de/d_v_2017/BJNR130510017.html
- Feller C., Dümig A., Spirkander S. F. M., Ludwig-Ohm S., Wildenhues H., Garming H., Ziegler J., Paladey E. & Heid P. (2022). Stickstoffdüngung im Freilandgemüsebau (Broschüre Nr. 1778; S. 144). Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. <https://www.ble-medianservice.de/1778/stickstoffduengung-im-freilandgemuesebau?c=152>
- Feller C., Fink M., Laber H., Maync A., Paschold P., Scharpf H. C., Schlaghecken J., Strohmeyer K., Weier U. & Ziegler J. (2011). Düngung im Freilandgemüsebau. In: M. Fink (Ed.), Schriftenreihe des Leibniz-Instituts für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ) (3. Auflage). IGZ.
- Flisch R., Neuweiler R., Kuster T., Oberholzer H., Huguenin-Elie O. & Richner W. (2017). 2/ Caractéristiques et analyses du sol. Dans: Principes de la fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF 2017). (Éd. W. Richner & S. Sinaj). Recherche Agronomique Suisse, 8(6), publication spéciale, 2/1–2/34. www.prif.ch
- Flisch R., Sinaj S., Charles R. & Richner W. (2009). Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages (DBF-GCH). Recherche Agronomique Suisse, 16(2), 1–97.
- Grand A. & Michel V. (2020). Compost: Avantages et inconvénients. Best4Soil. <https://www.best4soil.eu/factsheets>
- Grossrieder J., Ringger C., Argento F., Grandgirard R., Anken T. & Liebisch F. (2022). Fertilisation azotée spécifique au site: méthodes actuelles et expériences. Recherche Agronomique Suisse, 13, 103–113. <https://ira.agroscope.ch/fr-CH/Page/Publikation/Index/50030>
- Guntern J., Eichler A., Hagedorn F., Pellissier L., Schwikowski M., Seehausen O., Stamm C., van der Heijden M. G., Waldner P., Widmer I. & Altermatt F. (2020). Übermäßige Stickstoff- und Phosphoreinträge schädigen Biodiversität, Wald und Gewässer. Swiss Academies Factsheet, 15(8), 1–8. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4269631>

- Gysi C., Ryser J.-P. & Heller W. (2002). Fumure. Manuel des légumes. Union maraîchère suisse.
- Gysi Ch., Ryser J. P. & Heller W. (1997). Bodenuntersuchung im Gemüsebau. Flugschrift Nr. 112, 2. Auflage. Eidg. Forschungsanstalt für Obst-, Wein- und Gartenbau, Wädenswil.
- 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.
- Huber D. M. & Haneklaus S. (2007). Managing nutrition to control plant disease. Landbauforschung Volkenrode, 57(4), 313–322.
- Knickmann E. & Tepe W. (1966). Pflanzenernährung im Gartenbau (2. Auflage, Band 4). Verlag Eugen Ulmer Stuttgart.
- Krug H. (1991). Gemüseproduktion – Ein Lehr und Nachschlagewerk für Studium und Praxis (2. Auflage). Verlag Paul Parey.
- Lichtenhahn M., Koller M. & Schmutz R. (2003). Zwiebeln. Merkblatt. Forschungsinstitut für biologischen Landbau, Frick. <https://orgprints.org/id/eprint/2873/1/lichtenhahn-2003-zwiebeln.pdf>
- Liebisch F., Max J. F., Heine G. & Horst W. J. (2009). Blossom-end rot and fruit cracking of tomato grown in net-covered greenhouses in Central Thailand can partly be corrected by calcium and boron sprays. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 172(1), 140–150. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800180>
- Lindemann-Zutz K., Block R., Banna-Köthemann C., Meyer S. F., Graaff E., Lessmann C. & Kohl M. (2021). Massnahmen zur Steigerung der N-Effizienz im Freilandgemüsebau – Leitfaden für Beratung und Praxis. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen.
- Lorenz H.-P. (1989). Ordnungsgemässe Stickstoff-Versorgung im Freiland-Gemüsebau nach dem «Kulturbegleitenden N_{min} -Sollwerte(KNS)-System»: KNS-Daten für 38 Gemüsearten-145 Anbauverfahren. Verein Ehemaliger Gartenbauschüler.
- Neuweiler R. (2011). Lignes directrices de fumure en cultures maraîchères. Station de recherche Agroscope Changins-Wädenswil ACW.
- Neuweiler R. (2013). Optimisation de la dotation de soufre en cultures maraîchères de plein champ. Notice technique. Agroscope, Wädenswil. <https://ira.agroscope.ch/fr-CH/Page/Publikation?einzelpublikationId=31242>
- Neuweiler R. & Heller W. (2000). Compost and raised bed cultivation for preventing raspberry root disease. Proceedings 13th IFOAM Scientific Conference.
- Neuweiler R. & Krauss J. (2017). 10/ Fertilisation des cultures maraîchères. Dans: Principes de la fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF 2017). (Éd. W. Richner & S. Sinaj). Recherche Agronomique Suisse, 8(6), publication spéciale, 10/1–10/16. www.prif.ch
- 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. Édition Réalisée Par Centre Technique Interprofessionnel Des Fruits et Légumes, Paris, 398.
- OFEV & OFAG (2012). Éléments fertilisants et utilisation des engrais dans l'agriculture. Un module de l'aide à l'exécution pour la protection de l'environnement dans l'agriculture (n° 1225; p. 62). Office fédéral de l'environnement, Berne. L'environnement pratique. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/eaux/publications/publications-eaux/elements-fertilisants-utilisation-engrais-agriculture.html>
- ORRChim (2005). Ordonnance sur la réduction des risques, RO 2005 2917. <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2005/478/fr>

- Reif C., Arrigoni E., Neuweiler R., Baumgartner D., Nyström L. & Hurrell R. F. (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(23), 5819–5824. <https://doi.org/10.1021/jf301114p>
- Richner W., Flisch R., Mayer J., Schlegel P., Zähler M. & Menzi H. (2017). 4/ Propriétés et utilisation des engrais. Dans: Principes de la fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF 2017). (Éd. W. Richner & S. Sinaj). Recherche Agronomique Suisse, 8(6), publication spéciale, 4/1–4/24. www.prif.ch
- Schachtschabel P., Blume H.-P., Hartge K.-H. & Schwertmann U. (1984). Lehrbuch der Bodenkunde. Ferdinand Enke.
- Spann T. M. & Schumann A. W. (2010). Mineral nutrition contributes to plant disease and pest resistance. EDIS, 2010(4). <https://doi.org/10.32473/edis-hs1181-2010>
- Spiess E., Humphrys C., Liebisch F., Prasuhn V. & Neuweiler R. (2022). Nitratauswaschung unter Gemüse bei unterschiedlichem Ernterückstandsmanagement. Agroscope Science, 142, 1-26. <https://doi.org/10.34776/as142g>
- Taylor M. D. & Locascio S. J. (2004). Blossom-end rot: A calcium deficiency. Journal of Plant Nutrition, 27(1), 123–139. <https://doi.org/10.1081/PLN-120027551>
- Trott H. (2007). Mikronährstoffe in der Landwirtschaft und im Gartenbau: Bedeutung – Mangelsymptome – Düngung. 66 S. <https://www.iva.de/publikationen/mikronaehrstoffe-der-landwirtschaft-und-im-gartenbau>
- Vogel G., Hartmann H. D. & Krahnstöver K. (1996). Handbuch des speziellen Gemüsebaues. Eugen Ulmer.
- Wissemeier A. & Olf H. W. (2019). Diagnose des Ernährungszustands von Kulturpflanzen (A. Wissemeier, Ed.; 1. Auflage). Erling Verlag.
- Wonneberger C., Keller F., Bahnmüller H., Böttcher H., Geyer B. & Meyer J. (2004). Gemüsebau. Ulmer Stuttgart.
- Zemek, O., Neuweiler, R., Spiess, E., Stüssi, M. & Richner, W. (2020). Nitratauswaschungspotenzial im Freilandgemüsebau – eine Literaturstudie. Agroscope Science, 95, 117 S. <https://doi.org/10.34776/as95g>
- Zorn W., Marks G., Hess H. & Bergmann W. (2016). Handbuch zur visuellen Diagnose von Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen. Springer-Verlag.

11 Liste des tableaux

Tableau 1a. Besoins bruts en éléments nutritifs, teneur en éléments nutritifs des résidus de récolte et besoins nets en éléments nutritifs de diverses cultures maraîchères de plein champ (Neuweiler & Krauss, 2017).

Tableau 1b. Besoins bruts en éléments nutritifs et besoins nets en éléments nutritifs de diverses cultures maraîchères sous serre et tunnel (Neuweiler & Krauss, 2017).

Tableau 2a. Fertilisation azotée selon les analyses $N_{\min}$ en cultures de légumes de plein champ.

Tabelle 2b. Fertilisation azotée selon les analyses $N_{\min}$ en cultures de légumes sous serre et tunnel.

Tabelle 3. Rôle et utilisation des oligo-éléments en cultures de légumes.

Tabelle 4. Liste des symptômes de carence en éléments nutritifs.