



## 8/ Fertilisation des grandes cultures

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

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

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

Renseignements: sokrat.sinaj@agroscope.admin.ch

## Table des matières

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

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

## 1. Introduction

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

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

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

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



Parcelle de phacélie (photo: Agroscope).

## 2. Caractéristiques générales et besoins en éléments nutritifs



Parcelle de blé (photo: Agroscope).

### 2.1 Céréales à paille

#### 2.1.1 Caractéristiques générales

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

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

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

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

### 2.1.2 Besoins en éléments nutritifs

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

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

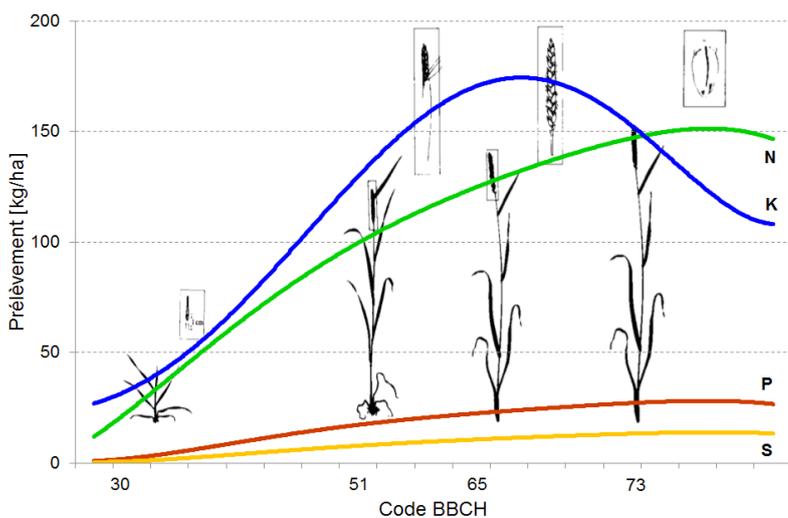


Figure 1. Courbe d'absorption des éléments nutritifs (N, P, K, et S) par la culture de blé (plante entière) sur la base d'un rendement de 60 dt/ha (adapté selon SCPA 1995) et en fonction du développement physiologique de la plante (échelle BBCH de Hack 1993).

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

### 2.1.3 Fertilisation azotée et rendement en grain

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

### 2.1.4 Fertilisation et qualité de la récolte

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

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

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

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

Critère	Effet de la fertilisation N	Appréciation selon la destination		
		Blé panifiable	Blé biscuitier	Blé fourrager
Poids à l'hectolitre	o/+	o/+	o/+	o/+
Poids de mille grains	o	o	o	o
Teneur en protéines	+	+	-	+
Zeleny <sup>1</sup>	+	+	-	o
Dureté du grain	+	+	-	o
Absorption en eau de la farine	o/+	o/+	o/-	o
Stabilité de la pâte	+	+	-	o
Perte de consistance de la pâte	+	+	-	o
Ténacité de la pâte	+	+	-	o
Ténacité/extensibilité de la pâte	+	+	+	o
Gélatinisation maximale	+	o/+	o	o

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

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

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

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

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

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

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

#### 2.1.5 Fertilisation et maladies

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

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



Parcelle de pomme de terre (photo: Agroscope).

## 2.2 Pomme de terre

### 2.2.1 Caractéristiques générales

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

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

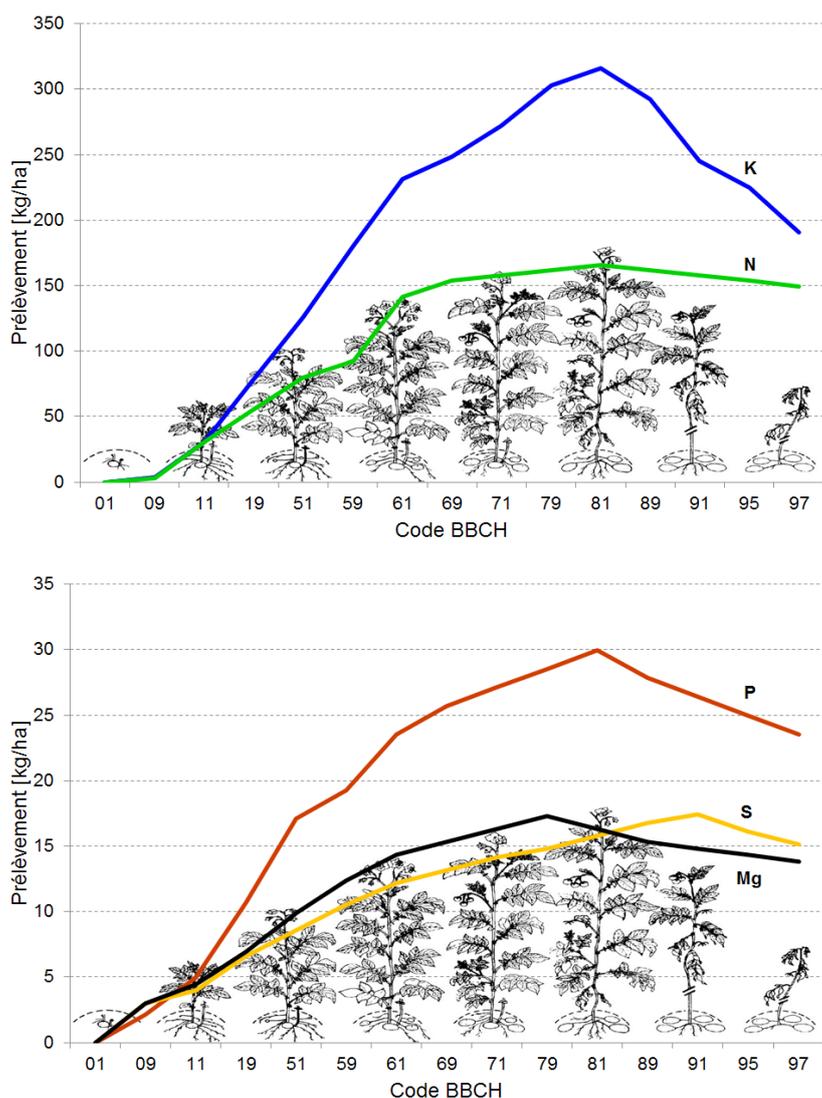


Figure 2. Courbe d'absorption des éléments nutritifs (N, P, K, S, Mg) par la pomme de terre (variété José – rendement 45t/ha) (SCPA 1995) en fonction du développement physiologique de la plante (échelle BBCH de Hack 1993).

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

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

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

### 2.2.2 Besoins en éléments nutritifs

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

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

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

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

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

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

### 2.2.3 Fertilisation et qualité des récoltes

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

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

### 2.2.4 Fertilisation et maladies

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

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



Parcelle de colza (photo: Agroscope).

## 2.3 Cultures oléagineuses (colza et tournesol)

### 2.3.1 Caractéristiques générales

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

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

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

### 2.3.2 Besoins en éléments nutritifs

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

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

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

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

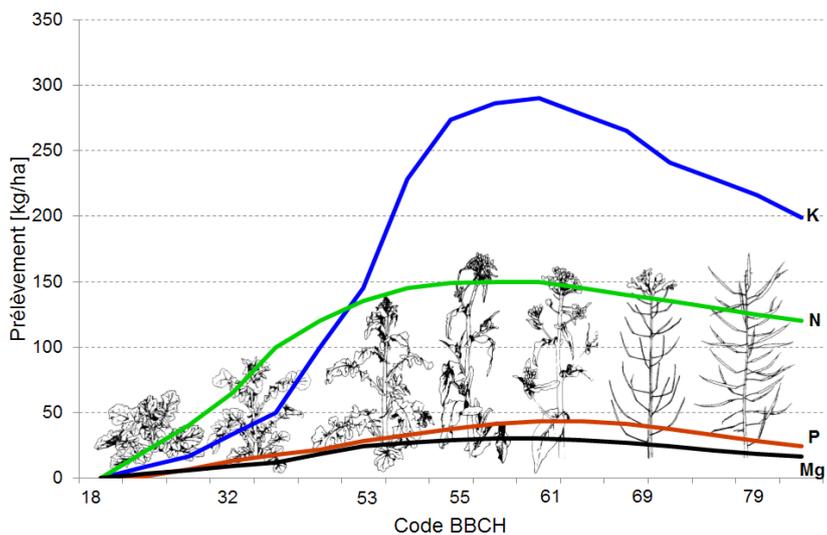


Figure 3. Courbe d'absorption des éléments nutritifs (N, P, K, Mg) par le colza en fonction du développement physiologique de la plante (SCPA 1995; échelle BBCH de Hack 1993).



Plantes de tournesol (photo: Agroscope).

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

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

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

### 2.3.3 Fertilisation et qualité de la récolte

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

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

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

o sans influence ; + augmentation ; - diminution.

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

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

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

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

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

### 2.3.4 Fertilisation et maladies

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

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



Gosses de pois protéagineux (photo: Agroscope).

## 2.4 Protéagineux

### 2.4.1 Caractéristiques générales

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

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

### 2.4.2 Besoins en éléments nutritifs

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

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



Epi de maïs à maturité (photo: Agroscope).

## 2.5 Maïs

### 2.5.1 Caractéristiques générales

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 2.5.3 Fertilisation et qualité

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

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

### 2.5.4 Fertilisation et maladies

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

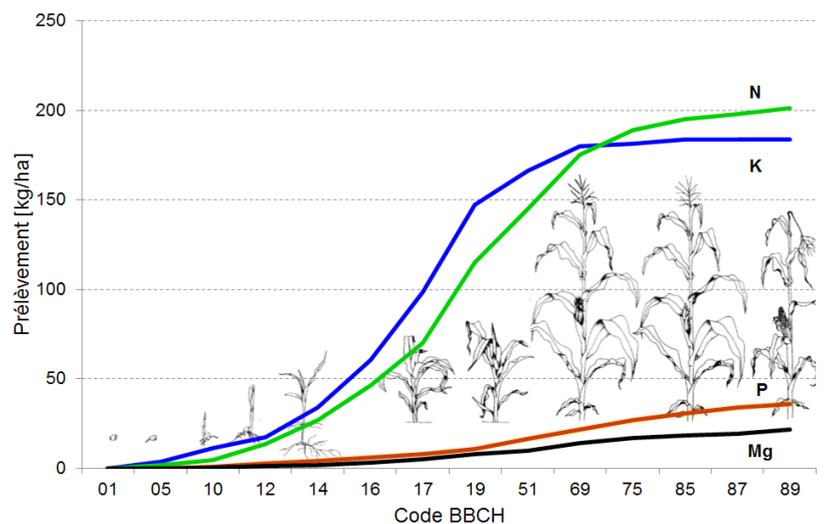


Figure 4. Somme des éléments nutritifs absorbés par le maïs jusqu'au stade de développement 89. (Adapté de Buchner et Sturm 1985 et UNIFA, 2015; échelle BBCH de Hack, 1993).

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

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

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

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



Parcelle de betterave (photo: Agroscope).

## 2.6 Betterave sucrière

### 2.6.1 Caractéristiques générales

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

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

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

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

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

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

o sans influence ; + influence positive ; – influence négative

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

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

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



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

## 2.7 Systèmes de culture et cultures intermédiaires

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

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

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

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



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

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

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

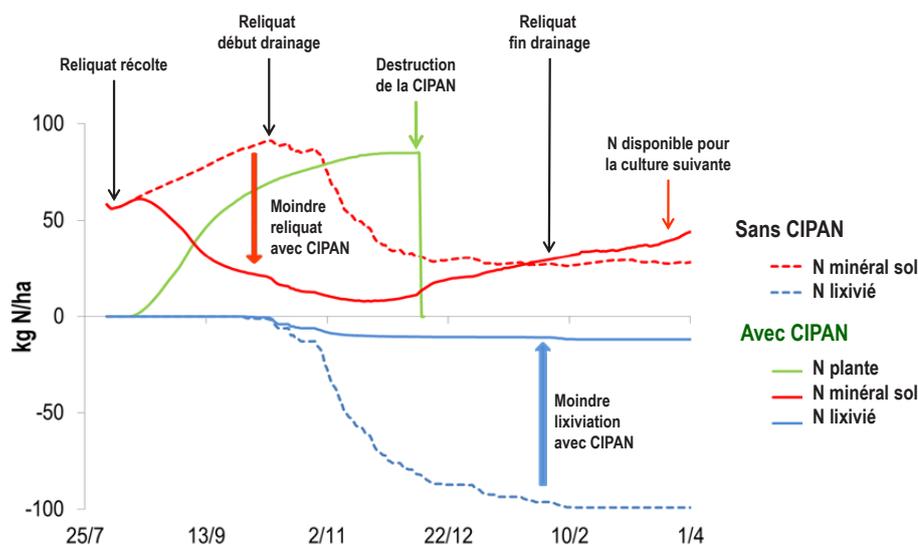


Figure 5. Gestion du N en interculture de fin juillet à fin mars (Justes et al. 2013). CIPAN: culture intermédiaire piège à nitrates.

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

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

fertilisante de ces couverts végétaux lors de leur destruction.

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

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

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

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

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

<sup>1</sup> Matière sèche.

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

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

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

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

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

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

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

## 3. Normes de fertilisation

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

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

### 3.1 Fertilisation azotée

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

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

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

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

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

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

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

Tableau 9 (suite)

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

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

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

Tableau 9 (suite)

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

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

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

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

Tableau 9 (suite)

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

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

Tableau 9 (suite)

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

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

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

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

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

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

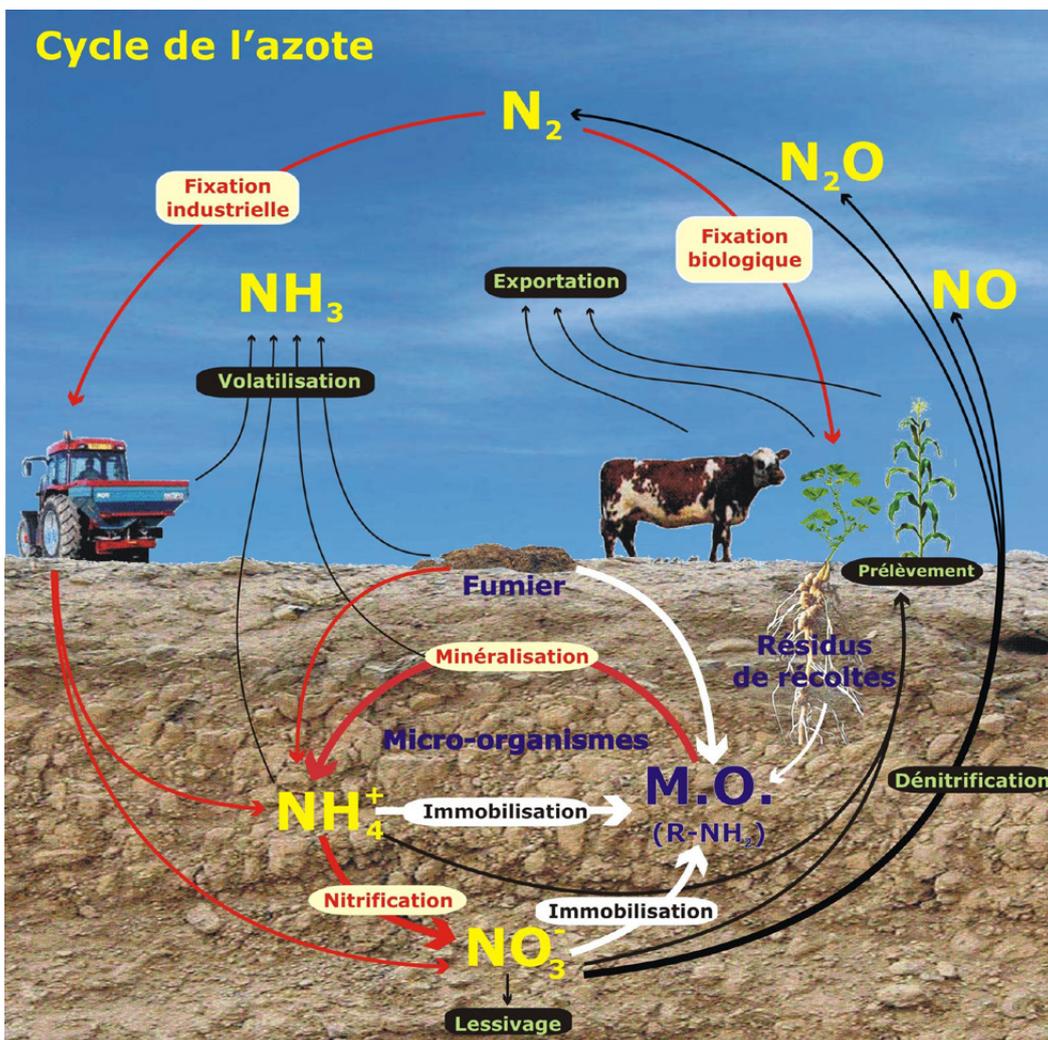
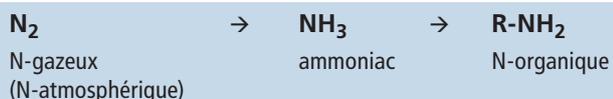


Figure 6. Cycle de l'azote à l'échelle parcellaire.

### 3.1.1 Cycle de l'azote

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

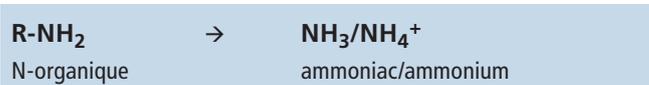
La **fixation** est le processus de conversion du N atmosphérique en une forme disponible pour les plantes.



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

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

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



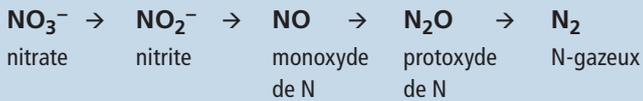
L'intensité de la minéralisation dépend de la teneur et de la qualité de la MO du sol, du précédent cultural, de l'arrière-effet des engrais organiques (engrais de ferme, résidus de récolte, engrais verts), du climat (température, humidité) et de la présence d'oxygène dans le sol (aération)

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



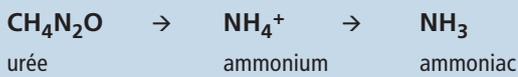
Le nitrate est la forme la plus disponible du N du sol mais elle est très sensible aux pertes par lessivage.

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



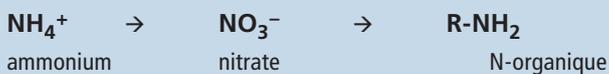
Comme la dénitrification survient en absence d'oxygène, les émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  sont plus importantes dans les sols lourds, compactés et mal drainés, ou dans des zones d'accumulation d'eau.

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



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

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



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

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

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

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

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

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

#### 3.1.2.1 Méthode des normes corrigées

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 3.1.2.2 Méthode $N_{\min}$

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

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

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

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

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

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

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

#### 3.1.3.1 Méthode du bilan prévisionnel

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

<sup>b</sup> Blé, épeautre avoine.

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

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

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

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

### 3.1.3.2 Modèles de simulation

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

### 3.1.3.3 Outils d'aide à la décision

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



N-Tester (photo: Agroscope).

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

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

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

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

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

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

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

### 3.2 Fertilisation phosphatée, potassique et magnésienne

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

#### 3.2.1 Etablissement de la norme de fertilisation

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

#### Prélèvement

$$\begin{aligned} \text{Rendement de référence} \times \text{Concentration dans la plante} \times \text{Correction culture} &= \text{Norme de fertilisation} \\ (\text{Norme de fertilisation} \times \text{Correction sol}) - \text{Résidus année précédente} &= \text{Norme corrigée} \end{aligned}$$

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 3.3 Soufre

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## 3.4 Bore, manganèse et autres oligo-éléments

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

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

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

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

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

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

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

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

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

#### 4. Résidus de récolte

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

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

## 5. Pratique de la fertilisation

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

### 5.1 Plan de fumure

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

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

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

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

### 5.2 Choix des engrais

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

#### 5.2.1 Céréales

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

#### 5.2.2 Pomme de terre

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

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

Tableau 25. Exemple d'un plan de fumure.

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

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

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

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

### 5.2.3 Maïs

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

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

## 5.3 Moment d'application et fractionnement des apports

### 5.3.1 Céréales

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

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



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

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

### 5.3.2 Pomme de terre

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

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

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

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

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

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

<sup>2</sup> Réserve en eau facilement utilisable > 70 mm.

<sup>3</sup> > 450 mm de précipitations de janvier à juin.

<sup>4</sup> Réserve en eau facilement utilisable < 70 mm.

Tableau 26 (suite)

Culture ou groupe de cultures	Régions séchardes <sup>1</sup> ou sols profonds <sup>2</sup>		Régions pluvieuses <sup>3</sup> ou sols peu profonds <sup>4</sup>	
	Epoque ou stade	Apport maximal (kg N/ha)	Epoque ou stade	Apport maximal (kg N/ha)
<b>Oléagineux et plantes destinées à la production de fibres</b>				
Lin oléagineux	Au semis	50	Au semis	20
	Plante 15–20 cm	30	Plante 15–20 cm	40
Lin à fibres	Au semis	30	Au semis	20
	Plante 15–20 cm	30	Plante 15–20 cm	40
Roseau de Chine	Début végétation	40	Début végétation	40
Kénaif	Au semis	50	Au semis	30
	Plante 15–20 cm	50	Plante 15–20 cm	60
<b>Autres cultures</b>				
Engrais verts	Au semis	40	Au semis	40
Tabac Burley	Plantation	100	Plantation	80
	4–6 feuilles	80	4–6 feuilles	100
Tabac Virginia	Plantation	30	4–6 feuilles	30

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

<sup>2</sup> Réserve en eau facilement utilisable > 70 mm.

<sup>3</sup> > 450 mm de précipitations de janvier à juin.

<sup>4</sup> Réserve en eau facilement utilisable < 70 mm.



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

réalisé peu avant l'initiation de la tubérisation. Si une seule application d'engrais PK est réalisée, il est recommandé de l'appliquer tôt dans la saison afin de palier à la faiblesse du système racinaire.

### 5.3.3 Maïs

Jusqu'au stade 6 feuilles, les besoins du maïs en éléments fertilisants sont faibles (figure 4). Toutefois, dans les sols qui se réchauffent lentement, une fertilisation localisée au semis peut stimuler le développement juvénile. Pour les éléments peu mobiles (P, K) l'idéal est de les épandre avant le semis. L'azote, en revanche, doit être épandu de manière fractionnée (tableau 26) pour tenir compte du risque de lessivage, en particulier dans les régions à fortes précipitations ou dans les bassins ver-

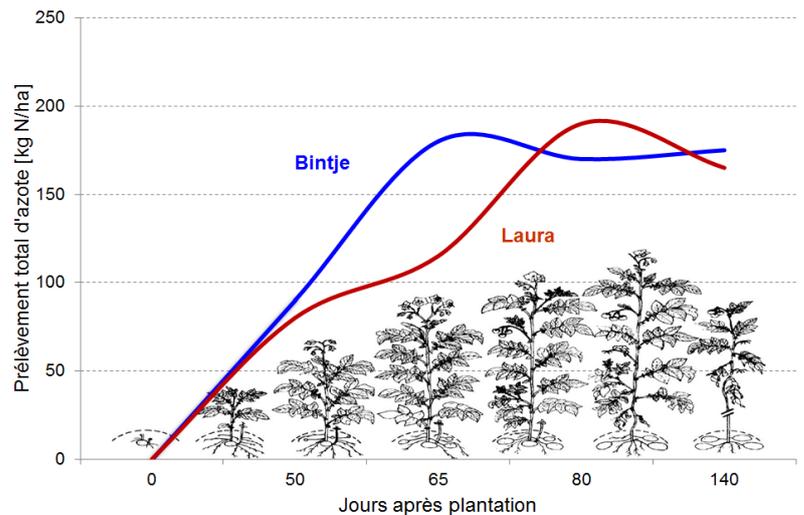


Figure 9. Courbes d'absorption du N par les variétés Bintje et Laura pour un apport de 120 kg N/ha (Sinaj et al. 2014).

sants aboutissant dans un lac. Dans de telles situations, les apports foliaires devraient être effectués seulement au moment où les besoins du maïs sont élevés (figure 4). Compte tenu de la simultanéité de la minéralisation de l'azote dans le sol et des besoins du maïs, les apports effectués jusqu'au stade 8 feuilles sont les plus efficaces pour couvrir les besoins importants jusqu'au stade floraison.

## 5.4 Techniques d'épandage

### 5.4.1 Pomme de terre

Le fractionnement des apports en N (tableau 26) est de moins en moins pratiqué par les producteurs de pommes de terre et la dose totale de N est souvent apportée en une seule fois à la plantation. Cette pratique peut aller de pair avec les techniques de plantation dites all-

in-one, de plus en plus populaires, et par lesquelles la plantation, le buttage et l'apport d'engrais se font en une seule opération. Si auparavant la fertilisation N était apportée sur les buttes avant un buttage, il est désormais courant d'appliquer l'engrais N avant la plantation ou localement sur le rang (Martin 2014). En matière d'optimisation de la disponibilité en N pour la plante, cette pratique n'est pas idéale car une bonne partie du N apporté peut être lessivé avant que la plante n'ait eu le temps de développer son système racinaire (Sinaj *et al.* 2014).

La fertigation est déjà pratiquée depuis de nombreuses années aux Etats-Unis et dans les pays du bassin méditerranéen. La technique consiste à associer l'engrais à l'eau d'irrigation. Elle offre deux avantages principaux: (i) sa facilité de mise en œuvre (une fois le système d'irrigation installé) et (ii) son aspect «dynamique», c'est-à-dire qu'elle permet de fournir l'eau et les éléments nutritifs à la plante au moment où elle en a besoin. Les techniques de fertigation au goutte-à-goutte permettent de limiter les pertes de N par lessivage en comparaison à l'irrigation par sprinkler (Darwish *et al.* 2003). En revanche, aucune augmentation significative du rendement n'est observée par rapport à une fertilisation classique (Battilani *et al.* 2008; Mohamad *et al.* 1999).

#### 5.4.2 Maïs

Les engrais sont épandus avant le semis et incorporés au sol ou localisés (P et N) près de la ligne au moment du semis. Les épandages d'azote doivent être fractionnés et les quantités doivent être nuancées selon le climat et le sol, sans dépasser les valeurs indiquées dans le tableau 26. Un apport foliaire en surface à un stade plus avancé est possible mais il vaut mieux éviter les risques de brûlure des feuilles. Un épandage entre les lignes, avec incorporation immédiate, évite ce risque et place l'engrais directement à portée des racines. Dans le cas de l'épandage entre les lignes, ou s'il y a des paquets d'engrais, les racines se développent principalement dans l'espace proche des nutriments. En revanche, la répartition spatiale réalisée par l'épandage en surface favorise le développement d'une masse racinaire en tous sens.

Les engrais de ferme doivent être injectés dans le sol ou rapidement incorporés après épandage afin de réduire autant que possible les pertes d'azote par volatilisation.

### 5.5 Possibilités d'optimisation ou de réduction de la fertilisation N

L'optimisation de l'utilisation de l'azote proposée par les méthodes de fertilisation présentées plus haut (voir chapitre 3.1) peut être encore renforcée par une stratégie dynamique de la fertilisation à l'échelle de l'exploitation. Une pratique extensive de la fertilisation est aussi envisageable. Dans ce cas, les recommandations suivantes peuvent être formulées:

- Dans le cadre d'une fertilisation équilibrée à l'échelle de l'exploitation, procéder à la distribution d'un contingent

limité de N sur les cultures selon des critères économiques.

- Diluer suffisamment les apports de purin (au minimum 1:2, idéalement 1:3) afin de limiter les pertes par volatilisation (module 7).
- Diminuer le risque de pertes en N par volatilisation en choisissant des engrais dont la proportion en nitrates est plus importante.
- Eviter d'appliquer une dose fractionnée supérieure à 60 kg N/ha.
- Tenir compte de manière systématique des réserves du sol ( $N_{\min}$  ou normes corrigées).
- Planifier les apports d'engrais à l'échelle de l'exploitation pour tenir compte des besoins spécifiques des cultures les plus exigeantes et des cultures valorisant le mieux le N.
- Réduire, voire même faire l'impasse sur le 3<sup>e</sup> apport de N pour les céréales ou décaler le 2<sup>e</sup> apport, surtout en cultures extensives, pour les blés fourragers.
- Considérer les prévisions météorologiques à moyen terme pour éviter d'amener du N en trop grande quantité avant une période particulièrement pluvieuse ou trop tard par rapport à des prévisions de conditions sèches.
- Supprimer l'apport de N au semis ou à la plantation pour les betteraves, le maïs et les pommes de terre.
- Renoncer à tout apport de N pour les engrais verts en utilisant des mélanges à base de légumineuses pour les conditions avec une faible minéralisation.

### 5.6 Possibilités de simplification de la fertilisation P, K et Mg

La fertilisation de rotation permet de simplifier la fertilisation annuelle en P, K et Mg sur une parcelle dont la rotation est définie. Elle consiste à totaliser les besoins nets de la rotation, à les diviser par le nombre de cultures et à appliquer annuellement la quantité moyenne obtenue. Cette manière de faire nécessite l'élaboration d'un plan de fumure et ne convient que pour les parcelles dont la rotation est stable. Elle est aisément applicable dans les parcelles dont le niveau de fertilité est «satisfaisant» ou «riche» (classe de fertilité C ou D). Elle peut devenir problématique lorsque le sol est «pauvre» et que la rotation comprend (i) soit une culture ayant des besoins élevés, (ii) soit une culture susceptible de faire une consommation de luxe d'un de ces éléments. Lors de l'établissement du plan de fumure, il se peut aussi que la quantité d'engrais P, K et Mg à appliquer sur certaines parcelles soit faible ou qu'elle soit difficile à épandre d'un point de vue technique. Dans ce cas une impasse peut être envisagée selon les critères du tableau 27.

**Impasse:** Renoncement à tout apport d'engrais minéral parce que les besoins de la culture envisagée sont largement couverts par les réserves du sol, par les restitutions de la culture précédente ou, le cas échéant, par la fertilisation organique et la déduction anticipée des résidus de récolte de la culture à venir (par ex. avec du tournesol). L'impasse peut être faite lorsque les quantités d'engrais minéral à apporter sont très faibles et ne représentent qu'une fraction de la norme.

**Tableau 27. Possibilités d'impasse sur la fertilisation minérale P, K et Mg en fonction de la richesse du sol et de la profondeur utile.**

Fertilité du sol selon analyse	Profondeur utile du sol <sup>1</sup>	Possibilité de renoncer à PK	Possibilité de renoncer à Mg
Pauvre	superficiel	non	non
	profond	non	non
Médiocre	superficiel	non	non
	profond	oui	oui
Satisfaisant	superficiel	oui	non
	profond	oui	oui
Riche	superficiel	oui	oui
	profond	oui	oui

<sup>1</sup> Sol superficiel: < 70 cm de profondeur utile;  
sol profond: > 70 cm de profondeur utile.

## 6. Bibliographie

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

Agu C. M., 2006. Effect of nitrogen and phosphorus combination on late blight disease and potato yield. *Tropical Science* 44 (4), 163–165.

Allison M. F., Fowler J. H. & Allen E. J., 2001a. Factors affecting the magnesium nutrition of potatoes (*Solanum tuberosum*). *Journal of Agricultural Science* 137, 397–409.

Allison M. F., Fowler J. H. & Allen E. J., 2001b. Responses of potato (*Solanum tuberosum*) to potassium fertilizers. *Journal of Agricultural Science* 136, 407–426.

Arvalis, 2014. Optimiser l'alimentation de la plante en fractionnant l'azote. In: Interventions de printemps : un tournant décisif pour réussir ses cultures. ARVALIS-CETIOM infos, janvier 2014, 3–4.

Arnon I., 1975. Mineral nutrition of Maize. International potash institute, Bern, Switzerland. 452 p.

Aubertot J. N., Pinochet X. & Doré T., 2003. The effects of sowing date and nitrogen availability during vegetative stages on *Leptosphaeria maculans* development on winter oilseed rape. *Crop Protection* 23 (7), 635–645.

Battilani A., Plauborg F., Hansen S., Dolezal F., Mazurczyk W., Bizik J. & Coutinho J., 2008. Nitrogen uptake and nitrogen use efficiency of fertigated potatoes. *Acta Horticulturae* 792, 61–67.

Bedoussac L., Journet E.-P., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre-Hellou G., Jensen E. S., Prieur L. & Justes E., 2015. Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 35, 911–935.

Brabant C. & Levy Häner L., 2016. Influence de la fumure azotée et de son fractionnement sur la qualité boulangère du blé. *Recherche Agronomique Suisse* 7 (2), 88–97.

Büchi L., Gebhard C.-A., Liebisch F., Sinaj S., Ramseier H. & Charles R., 2015. Accumulation of biologically fixed nitrogen by legumes cultivated as cover crops in Switzerland. *Plant and Soil* 393 (1), 163–175.

Büchi L., Mouly P., Amossé C., Bally C., Wendling M. & Charles R., 2016. Méthode non destructive d'estimation de la biomasse et des nutriments de couverts végétaux. *Recherche Agronomique Suisse* 7 (3), 136–143.

Buchner A. & Sturm H., 1985. Gezielter Düngen. DLG-Verlag, Frankfurt am Main, Germany. 381 p.

Burns I. G., 2006. Assessing N fertilizer requirements and the reliability of different recommendation systems. *Acta horticulturae* 700, 35–48.

**Seuils de renoncement:** Le renoncement est envisageable (i) en dessous de 100 kg/ha d'engrais pour les engrais P et K simples ou composés et (ii) en dessous de 50 kg/ha d'engrais pour les engrais magnésiens spécifiques.

**Report des déficits:** Renoncer à un apport implique que les déficits du bilan parcellaire seront pris en compte dans le plan de fumure de l'année suivante.

Buschbell T. & Hoffmann G. M., 1992. The effects of different nitrogen regimes on the epidemiologic development of pathogens on winter-wheat and their control. *Journal of Plant Diseases and Protection* 99, 381–403.

Cao W. & Tibbitts T. W., 1998. response of potatoes to nitrogen concentrations differ with nitrogen forms. *Journal of Plant Nutrition* 21 (4), 615–623.

Champolivier L. & Reau R., 2005. Améliorer la richesse en huile des oléagineux pour répondre aux besoins du marché. *Oléoscope* 82, 10–13.

Charles R., Cholley E. & Mascher-Frutschi F., 2011. Maladies et rendement de blé d'automne: influence du système de culture. *Recherche Agronomique Suisse* 2 (6), 264–271.

Charles R. & Vullioud P., 2001. Pois protéagineux et azote dans la rotation. *Revue suisse d'Agriculture* 33 (6), 265–270.

Charles R., Collaud J.-F., Levy L. & Sinaj S., 2012. Variétés, densité de semis et fumure azotée sur orge d'automne. *Recherche Agronomique Suisse* 3 (2), 88–95.

Cohan J.P., 2014. Engrais, bien choisir la forme à apporter. In: Innovations et performances pour la pomme de terre. ARVALIS infos, juin 2014, 14–15.

Colin J. & Goffart J. P., 1998. La gale commune de la pomme de terre en Belgique: Ses causes, ses conséquences, ses remèdes. Centre de Recherche Agronomique, Gembloux; Station de Phytotechnie, Louvain-la-Neuve; Université Catholique du Louvain, Clinique des Plantes (CORDER). 35 p.

Colomb B., 1992. Le magnésium: bases disponibles pour l'élaboration d'un système de recommandation de fumure. In: Le magnésium en agriculture. Editions C.H.E.M.C., INRA, Paris, France, 187–209.

COMIFER, 2013. Calcul de la fertilisation azotée – Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales – Cultures annuelles et prairies. Editions COMIFER, Puteaux, 159 p. Accès: [http://www.comifer.asso.fr/images/publications/brochures/BROCHURE\\_AZOTE\\_20130705web.pdf](http://www.comifer.asso.fr/images/publications/brochures/BROCHURE_AZOTE_20130705web.pdf) [10. 5. 2017].

Courvoisier N., Levy Häner L., Schwaerzel R., Bertossa M., Thévoz E., Hiltbrunner J., Anders M., Stoll P., Weissflog T., Scheuner S., Dugon J. & Grünig K., 2015. Liste recommandée des variétés de céréales pour la récolte 2016. *Recherche Agronomique Suisse* 6 (6), 1–8.

Darwish T., Atallah T., Hajhasan S. & Chranek A., 2003. Management of nitrogen by fertigation of potato in Lebanon. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 67 (1), 1–11.

Datnoff L. E., Elmer W. H. & Huber D. M., 2009. Mineral nutrition and plant disease. 2nd edition. APS Press, St. Paul, Minnesota, USA. 278p.

Debaeke P. & Estragnat A., 2003. A simple model to interpret the effects of sunflower crop management on the occurrence and severity of a major fungal disease: Phomopsis stem canker. *Field crop research* 83,139–155.

- Debaeke P. & Perez, A. 2003. Influence of sunflower (*Helianthus annuus* L.) crop management on Phoma black stem (Phoma macdonaldii Boerema). *Crop Protection* 22, 741–752.
- Demaria P., Flisch R., Frossard E. & Sinaj S., 2005. Exchangeability of phosphate extracted by four chemical methods. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168, 89–93.
- Dirks-Scheffer, 1930. Der Kohlensäure-Bikarbonatauszug und der Wasserauszug als Grundlage zur Ermittlung der Phosphorsäurebedürftigkeit der Böden. *Landwirtschaftliche Jahrbücher* 71, 73–99.
- Dupuis B., Reust W., Hebeisen T. & Ballmer T., 2009. Fumure azotée de nouvelles variétés de pommes de terre cultivées en Suisse. *Revue suisse d'Agriculture* 41 (4), 209–214.
- Fritsch F., 2003. Anwendung von Düngemitteln in landwirtschaftlichen Kulturen: Kartoffeln. In: *Praxishandbuch Dünger und Düngung*, AGRIMEDIA GmbH, Bergen/Dumme, Germany. 311 p.
- Frossard E., Julien P., Neyroud J.-A. & Sinaj S., 2004. Le phosphore dans le sol. Etat de la situation en Suisse. *Cahier de l'environnement n°368*, Office fédéral de l'environnement, des forêts et des paysages, Berne, Suisse, 180 p.
- Gash A. F. J., 2012. Wheat nitrogen fertilisation effects on the performance of the cereal aphid *Metopolophium dirhodum*. *Agronomy* 2 (1), 1–13.
- Hack H., 1993. Echelle BBCH des stades phénologiques de la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.). *JKI Open Journal System* 7.
- Holzschläger A., Fossati D., Hiltbrunner J. & Fuhrer J., 2015. Spatial and temporal trends in agro-climatic limitations to production potentials for grain maize and winter wheat in Switzerland. *Regional Environmental Change* 15 (1), 109–122.
- Hebeisen T., Ballmer T., Wüthrich R. & Dupuis B., 2012. Réaction à la fumure azotée de nouvelles variétés de pommes de terre admises à la liste officielle. *Recherche Agronomique Suisse* 1 (3), 82–87.
- Iwama K., 2008. Physiology of the Potato: New Insights into Root System and Repercussions for Crop Management. *Potato research* 51 (3–4), 333–353.
- Jordan V. W. L., Stinchcombe G. R. & Hutcheon J. A., 1989. Fungicide and nitrogen applications in relation to the improvement of disease control and yield in winter barley. *Plant Pathology* 38, 26–34.
- Justes E., Beaudoin N., Bertuzzi P., Charles R., Constantin J., Dürr C., Hermon C., Joannon A., Le Bas C., Mary B., Mignolet C., Montfort F., Ruiz L., Sarthou J. P., Souchère V., Tournebize J., Savini I. & Réchauchère O., 2013. Les cultures intermédiaires pour une production agricole durable. Editions Quae, Versailles, France. 112 p.
- Justes E., Mary B. & Nicolardot B., 2009. Quantifying and modeling C and N mineralization kinetics of catch crop residues in soil: parameterization of the residue decomposition module of STICS model for mature and non mature residues. *Plant and Soil* 325, 171–185.
- Karam F., Roupheal Y., Lahoud R., Breidi J. & Colla G., 2009. Influence of genotypes and potassium application rates on yield and potassium use efficiency of potato. *Journal of agronomy* 8 (1), 27–32.
- Kolbe H. & Stephan-beckmann S., 1997. Development, growth and chemical composition of the potato crop (*Solanum tuberosum* L.). II. Tuber and whole plant. *Potato Research* 40 (2), 135–153.
- Krnjaja V., Mandic V., Levic J., Stankovic S., Petrovic T., Vasic T. & Obradovic A., 2015. Influence of N-fertilisation on Fusarium head blight and mycotoxin levels in winter wheat. *Crop Protection* 67, 251–256.
- Lagarde F. & Champolivier L., 2006. Le raisonnement et les avancées techniques permettent de réduire la fertilisation azotée : le cas de Farmstar-colza®. *OCL* 13, 384–387.
- Lemmens M., Haim K., Lew H. & Ruckenbauer P., 2004. The Effect of Nitrogen Fertilization on Fusarium Head Blight Development and Deoxynivalenol Contamination in Wheat. *Journal of Phytopathology* 152 (1), 1–8.
- Levy L., Schwaerzel R., Kleijer G. & Crozet N., 2009. Influence de la fumure azotée sur la qualité des blés biscuitiers. *Revue suisse d'Agriculture* 41 (5), 277–282.
- Levy L., Schwaerzel R. & Kleijer G., 2007. Influence de la fumure azotée sur la qualité des céréales panifiables. *Revue suisse d'Agriculture* 39, 255–260.
- Levy L. & Schwaerzel R., 2009. Fumure azotée et performances agronomiques de variétés de blé et de triticales. *Revue suisse d'Agriculture* 41 (3), 161–165.
- Levy Häner L., Stamp P., Kreuzer M., Bouguennec A. & Pellet D., 2013. Experimental Determination of Genetic and Environmental Influences on the Viscosity of Triticale. *Cereal Research Communications* 41 (4), 613–625.
- Levy Häner L. & Brabant C. 2016. L'art de fractionner l'azote pour optimiser le rendement et la teneur en protéines du blé. *Recherche Agronomique Suisse* 7 (2), 80–87.
- Limaux F., Recous S., Meynard J.M. & Guckert A., 1999. Relationship between rate of crop growth at date fertiliser N application and fate of fertiliser N applied to winter wheat. *Plant and Soil* 214, 49–59.
- Lucas M. E., Hoad S. P., Russell G. & Bingham I. J., 2000. Management of cereal root systems. *Research review* No. 43. HGCA.
- Machet J.M., Recous S., Jeuffroy M.H., Mary B., Nicolardot B. & Parnaudeau V., 2003. A dynamic version of the predictive balance sheet method for fertilizer N advice. In: *Controlling nitrogen flows and losses*, 12th Nitrogen Workshop, 21st–24th September 2003, Exeter, Devon, UK.
- Maltas A., Oberholzer H., Charles R., Bovet V. & Sinaj S., 2012a. Effet à long terme des engrais organiques sur les propriétés du sol. *Recherche Agronomique Suisse* 3 (3), 148–155.
- Maltas A., Charles R., Bovet V. & Sinaj S., 2012b. Effet à long terme des engrais organiques sur le rendement et la fertilisation azotée des cultures. *Recherche Agronomique Suisse* 3 (3), 156–163.
- Maltas A., Charles R., Jeangros B. & Sinaj S., 2013. Effect of organic fertilizers and reduced-tillage on soil properties, crop nitrogen response and crop yield: Results of a 12-year experiment in Changins, Switzerland. *Soil & Tillage Research* 126, 11–18.
- Maltas A., Charles R., Pellet D., Dupuis B., Baux A., Jeangros B. & Sinaj S., 2015. Evaluation de deux méthodes pour optimiser la fertilisation azotée des grandes cultures. *Recherche Agronomique Suisse* 6 (3), 84–93.
- Martin M., 2014. Implantation : attention à la structure du sol. In: *Innovations et performances pour la pomme de terre*, ARVALIS infos, Juin 2014, 10–12.
- Mascagni H.J. Jr., Harrison S.A., Russin J.S., Desta H.M., Colyer P.D., Habetz R.J., Hallmark W.B., Moore S.H., Rabb J.L., Hutchinson R.L. & Boquet D.J., 1997. Nitrogen and fungicide effects on winter wheat produced in the Louisiana Gulf Coast region. *Journal of Plant Nutrition* 20 (10), 1375–1390.
- Mestries E., Desanlis M., Seassau C., Moinard J., Debaeke P. & Dechamp-Guillaume G., 2011. Impact de la conduite de culture sur les maladies du tournesol. *Innovations agronomiques* 14, 91–108.
- Micheneau A., Champolivier L., Courtois N., Sinaj S., & Baux A., 2016. Réglette azote colza®: adaptation pour la Suisse d'un outil d'aide à la fertilisation azotée du colza. *Recherche Agronomique Suisse* 7 (9), 378–383.
- Mohammad M. J., Zuraiqi S., Quasameh W. & Papadopoulos I., 1999. Yield response and nitrogen utilization efficiency by drip-irrigated potato. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 54 (3), 243–249.
- Naud C., Makowski D. & Jeuffroy M. H., 2008. Is it useful to combine measurements taken during the growing season with a dynamic model to predict the nitrogen status of winter wheat? *European Journal of Agronomy* 28, 291–300.
- Neeteson J. J., 1990. Development of nitrogen fertilizer recommendations for arable crops in the Netherlands in relation to nitrate leaching. *Fertilizer research* 26 (1–3), 291–298.
- Neumann S., Paveley N.D., Beed F.D. & Sylvester-Bradley R. 2004. Nitrogen per unit leaf area affects the upper asymptote of Puccinia striiformis f.sp. tritici epidemics in winter wheat. *Plant Pathology* 53 (6), 725–732.

- Olesen J. E., Mortesen J. V., Jorgensen L. N. & Andersen M. N., 2000. Irrigation strategy, nitrogen application and fungicide control in winter wheat on a sandy soil. I. Yield yield components and nitrogen uptake. *Journal of Agricultural Science* 134 (1), 1–11.
- Olesen J.E., Jorgensen L.N., Petersen J. & Mortensen J.V., 2003. Effects of rate and timing of nitrogen fertilizer on disease control by fungicides in winter wheat. 1. Grain yield and foliar disease control. *Journal of Agricultural Science* 140 (1), 1–13.
- Pavlista A.D., 2005. Early-Season Applications of Sulfur Fertilizers Increase Potato Yield and Reduce Tuber Defects. *Agronomy Journal* 97, 599–603.
- Pellet D., 2000a. Dosage du nitrate dans les tiges pour affiner le pilotage de la fumure azotée du blé d'automne. I. La méthode Jubil est-elle adaptée aux variétés cultivées en Suisse? *Revue suisse d'Agriculture* 32 (3), 103–108.
- Pellet D., 2000b. Dosage du nitrate dans les tiges pour affiner le pilotage de la fumure azotée du blé d'automne. II. La méthode Jubil comme complément à celle des normes corrigées. *Revue suisse d'Agriculture* 32 (4), 165–171.
- Pellet D, Mercier E, Lavanchy J, Pfeiffer H, Keiser A & Bezençon N, 2003a. Optimisation de la fumure soufrée par estimation du risque de carence. I. Colza d'automne. *Revue suisse d'Agriculture* 35 (4), 161–167.
- Pellet D., Mercier E. & Balestra U., 2003b. Optimisation de la fumure soufrée par estimation du risque de carence. II. Blé d'automne. *Revue suisse d'Agriculture* 35 (4), 181–186.
- Pellet D. & Grosjean Y., 2007. Fumure azotée du tournesol: intérêt de la méthode Héliotest pour la Suisse. *Revue suisse d'Agriculture* 39 (1), 5–9.
- Reust W., Hebeisen T. & Ballmer T., 2006. Fumure azotée et nouvelles variétés de pommes de terre cultivées en Suisse. *Revue suisse d'Agriculture* 38 (6), 309–313.
- Richner W., Flisch R., Sinaj S. & Charles R., 2010. Détermination des normes de fumure azotée pour les grandes cultures. *Recherche Agronomique Suisse* 1 (11–12), 410–415.
- Ryckmans D., 2009. Quelques rappels sur la fumure phosphopotassique. In: *Fiwap info*, février 2009, 8.
- Sattelmacher B., Kuene R., Malagampa P. & Moreno U., 1990. Evaluation of tuber bearing *Solanum* species belonging to different ploidy levels for its yielding potential at low soil fertility. *Plant and Soil* 129, 227–233.
- Schvartz, C., Decroux J. & Muller J. C., 2005. Guide de la fertilisation raisonnée: grandes cultures et prairies. Comité français d'étude et de développement de la fertilisation raisonnée. Editions France Agricole, Paris, France. 414 p.
- Schwaerzel R., Torche J.-M., Ballmer T., Musa T. & Dupuis B., 2014. Liste suisse des variétés de pommes de terre 2015. *Recherche Agronomique Suisse* 5, 11–12.
- SCPA, 1995. Les courbes d'absorption d'éléments minéraux. Ministère de l'agriculture, France.
- Sinaj S., Richner W., Flisch R. & Charles R., 2009. Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages. *Revue suisse d'Agriculture* 41 (1), 98.
- Sinaj S., Maltas A., Dupuis B. & Pellet D., 2014. Response of two potato cultivars to nitrogen fertilization in Switzerland. In: 19th Triennial Conference of the European Association for Potato Research, 2014. Editions EAPR, Brussels, Belgium.
- Smiley R. W. & Cook R. J., 1973. Relationship between take-all of wheat and rhizosphere pH in soils fertilized with ammonium vs. nitrate-nitrogen. *Phytopathology* 63, 882–890.
- Söchting H. P. & Verreet J.-A., 2004. Effects of different cultivation systems (soil management, nitrogen fertilization) on the epidemics of fungal diseases in oilseed rape (*Brassica napus* L. var. *napus*). *Journal of Plant Diseases and Protection* 111 (1), 1–29.
- Sonderegger O. & Scheuner S., 2014. Bekenntnis zur Qualitätsstrategie – Getreidebranche einigt sich auf Proteinbezahlung. *SwissGranum*, Berne, Suisse. Accès: <http://www.swissgranum.ch>.
- Swiss granum, 2015. Produktionsflächen / Surfaces de production. Accès: [https://www.swissgranum.ch/files/2015-12-18\\_anbauflaechen.pdf](https://www.swissgranum.ch/files/2015-12-18_anbauflaechen.pdf) [10. 5. 2017].
- Swisspatat, 2015. Données statistiques 2014 sur la production et la mise en valeur des pommes de terre. Accès: <http://www.kartoffel.ch>.
- Tindall T. A., Westermann D. T., Stark J. C., Ojala J. C. & Kleinkopf G. E., 1993. Phosphorus Nutrition of Potatoes. *Current Information Series No. 903*, University of Idaho, USA.
- Trehan S. P. & Sharma R. C., 2002. Potassium uptake efficiency of young plants of three potato cultivars as related to root and shoot parameters. *Communication in Soil Science and Plant Analysis* 33 (11–12), 1813–1823.
- UNIFA, 2015. Les outils de raisonnement de l'apport de soufre. Accès: <http://fertilisation-edu.fr/le-raisonnement-de-la-fertilisation/azote-et-soufre/les-outils-de-raisonnement.html>.
- USP, 2014. Chapitre 2: Production végétale. In: *Statistiques et évaluations concernant l'agriculture et l'alimentation 2013*, Agrisat, Suisse. Accès: <http://www.sbv-usp.ch/>
- Vulliod P., 2005. Rotation des cultures en terres assolées. *Revue suisse d'Agriculture* 37 (4), 1–4.
- Wendling M., Büchi L., Amossé C., Sinaj S., Walter A. & Charles R., 2016. Influence of root and leaf traits on the uptake of nutrients in cover crops. *Plant Soil*, 1–16.
- Westermann D. T. & Kleinkopf G. E., 1985. Nitrogen requirements of potatoes. *Agronomy Journal* 77, 616–621.
- Yara, 2008. N-Tester®, le pilotage de l'azote tout simplement. Brochure disponible sur [www.yara.fr](http://www.yara.fr), 12 p.

## 7. Liste des tableaux

Tableau 1. Effet de la fertilisation N sur les caractéristiques du blé et rôle de ces critères selon sa destination. ....	8/4
Tableau 2. Influence de la fertilisation N, P et K sur la qualité des tubercules de la pomme de terre. ....	8/6
Tableau 3. Effets de la fertilisation N et S sur la richesse en huile et la concentration en glucosinolates du colza. ....	8/8
Tableau 4. Influence de carences ou d'excès de N, K, Mg et S sur les maladies du maïs. ....	8/11
Tableau 5. Influence de la fertilisation N, P et K sur la qualité de la betterave à sucre. ....	8/12
Tableau 6. Prélèvements en éléments nutritifs pour un choix de cultures intermédiaires. ....	8/14
Tableau 7. Estimation du N libéré ou bloqué pour la culture suivant une culture intermédiaire en fonction des espèces et de leur croissance. ....	8/14
Tableau 8. Récapitulatif des effets, atouts et limites des différents types de cultures intermédiaires. ....	8/15
Tableau 9. Rendements de référence, prélèvements et normes de fertilisation en N, P, K, Mg pour les grandes cultures. ....	8/16
Tableau 10. Correction de la norme de fertilisation N en fonction de la variété de pomme de terre. ....	8/20
Tableau 11. Correction de la fertilisation N lorsque le rendement cible diffère du rendement moyen de référence. ....	8/23
Tableau 12. Correction de la fertilisation N en fonction du potentiel de minéralisation de la MO. ....	8/23
Tableau 13. Correction de la fertilisation N en fonction du précédent cultural. ....	8/24
Tableau 14. Correction de la fertilisation N en fonction des arrière-effets des apports d'engrais organiques. ....	8/24
Tableau 15. Correction de la fertilisation N en fonction des pluies d'hiver et de printemps. ....	8/25
Tableau 16. Libération de N complémentaire suite à des sarclages répétés après la levée de la culture, selon le taux de matière organique du sol. ....	8/25
Tableau 17. Correction de la fertilisation N en fonction des conditions météorologiques (humidité et température) printanières et de l'état du sol. ....	8/25
Tableau 18. Stade et profondeur de prélèvement des échantillons pour la détermination du $N_{\min}$ . ....	8/26
Tableau 19. Fertilisation N des céréales basée sur la teneur en $N_{\min}$ du sol. ....	8/26
Tableau 20. Fertilisation N des cultures sarclées basée sur les teneurs en $N_{\min}$ du sol. ....	8/27
Tableau 21. Coefficients de correction de la norme P, K, Mg selon la culture. ....	8/29
Tableau 22. Paramètres permettant d'évaluer le risque de carence en S et d'estimer les besoins en fertilisation soufrée des cultures. ....	8/30
Tableau 23. Besoins en soufre de quelques cultures et recommandation de fertilisation soufrée. ....	8/31
Tableau 24. Apports de B et de Mn basés sur les résultats d'analyse de sol, le type de sol et la culture. ....	8/31
Tableau 25. Exemple d'un plan de fumure. ....	8/33
Tableau 26. Fractionnement, stade d'application optimal et dose maximale admissible pour les différents apports de N selon la pluviométrie et les conditions pédologiques. ....	8/35
Tableau 27. Possibilités d'impasse sur la fertilisation minérale P, K et Mg en fonction de la richesse du sol et de la profondeur utile. ....	8/38
<hr/>	
Annexe. Teneurs en éléments nutritifs des produits végétaux. ....	8/43

## 8. Liste des figures

Figure 1. Courbe d'absorption des éléments nutritifs (N, P, K, et S) par la culture de blé (plante entière) sur la base d'un rendement de 60 dt/ha et en fonction du développement physiologique de la plante. ....	8/4
Figure 2. Courbe d'absorption des éléments nutritifs (N, P, K, S, Mg) par la pomme de terre (variété José – rendement 45t/ha) en fonction du développement physiologique de la plante. ....	8/6
Figure 3. Courbe d'absorption des éléments nutritifs (N, P, K, Mg) par le colza en fonction du développement physiologique de la plante. ....	8/8
Figure 4. Somme des éléments nutritifs absorbés par le maïs jusqu'au stade de développement 89. ....	8/11
Figure 5. Gestion du N en interculture de fin juillet à fin mars. CIPAN : Culture intermédiaire piège à nitrates. ....	8/14
Figure 6. Cycle de l'azote à l'échelle parcellaire. ....	8/21
Figure 7. Présentation schématique de la méthode des normes corrigées. ....	8/23
Figure 8. Démarche pour calculer la norme de fertilisation en P, K et Mg. ....	8/28
Figure 9. Courbes d'absorption du N par les variétés Bintje et Laura pour un apport de 120 kg N/ha. ....	8/36

## 9. Annexe

Teneurs en éléments nutritifs des produits végétaux															
Culture	Rendement du produit récolté dt/ha	Produit	Teneur en MS %	Teneurs en éléments nutritifs (kg/t de matière fraîche)											
				N			P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )			K (K <sub>2</sub> O)			Mg		
				inf.	sup.	val.	inf.	sup.	val.	inf.	sup.	val.	inf.	sup.	val.
Blé automne (biscuitier et panifiable)	60	grain	85	15,0	25,0	20,2	3,3 (7,5)	4,4 (10,0)	3,6 (8,2)	2,9 (3,5)	4,6 (5,5)	3,6 (4,3)	0,8	1,2	1,2
	70	paille	85	3,0	7,0	3,1	0,4 (1,0)	1,3 (3,0)	0,8 (1,9)	5,8 (7,0)	12,5 (15,0)	8,9 (10,7)	0,6	1,0	0,7
Blé fourrager d'automne	75	grain	85	15,0	25,0	17,3	3,3 (7,5)	4,4 (10,0)	3,6 (8,2)	2,9 (3,5)	4,6 (5,5)	3,6 (4,3)	0,8	1,2	1,2
	75	paille	85	2,8	7,0	2,8	0,4 (1,0)	1,3 (3,0)	0,8 (1,9)	5,8 (7,0)	12,5 (15,0)	8,9 (10,7)	0,6	1,0	0,7
Blé de printemps	50	grain	85	18,0	26,0	20,2	3,1 (7,0)	4,3 (9,8)	3,6 (8,2)	2,5 (3,0)	4,2 (5,0)	3,6 (4,3)	1,0	1,4	1,2
	60	paille	85	3,0	7,0	3,1	0,5 (1,2)	1,0 (2,2)	0,8 (1,9)	6,6 (8,0)	11,6 (14,0)	8,9 (10,7)	0,3	0,7	0,7
Orge d'automne	60	grain	85	13,0	17,0	14,8	3,5 (8,0)	4,4 (10,0)	3,7 (8,4)	2,7 (4,5)	6,2 (7,5)	4,5 (5,4)	0,8	1,2	1,1
	60	paille	85	3,0	6,0	4,3	0,8 (1,8)	1,2 (2,8)	1,0 (2,2)	10,0 (12,0)	19,9 (24,0)	13,3 (16,0)	0,2	0,6	0,6
Orge de printemps	55	grain	85	10,0	16,0	14,8	3,1 (7,0)	3,9 (9,0)	3,7 (8,4)	4,2 (5,0)	5,8 (7,0)	4,5 (5,4)	0,9	1,3	1,1
	55	paille	85	3,0	7,0	4,3	0,8 (1,8)	1,2 (2,6)	1,0 (2,2)	13,3 (16,0)	19,9 (24,0)	13,3 (16,0)	0,2	0,6	0,6
Avoine d'automne	55	grain	85	13,0	19,0	16,0	3,1 (7,0)	3,9 (9,0)	3,5 (8,0)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,2 (5,0)	0,9	1,3	1,0
	70	paille	85	3,0	7,0	5,0	0,9 (2,3)	1,7 (3,1)	1,2 (2,7)	14,9 (18,0)	19,9 (24,0)	17,4 (21,0)	0,6	1,2	0,9
Avoine de printemps	55	grain	85	13,0	19,0	16,5	3,1 (7,0)	3,9 (9,0)	3,5 (8,0)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,2 (5,0)	0,9	1,3	1,0
	70	paille	85	3,0	7,0	4,1	1,0 (2,3)	1,4 (3,1)	1,2 (2,7)	14,9 (18,0)	19,9 (24,0)	17,4 (21,0)	0,6	1,2	0,9
Seigle d'automne	55	grain	85	13,0	18,0	13,0	3,1 (7,0)	3,9 (9,0)	3,5 (8,0)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,2 (5,0)	0,9	1,3	1,1
	70	paille	85	3,0	7,0	3,0	0,9 (2,0)	1,3 (3,0)	0,9 (2,0)	8,3 (10,0)	11,6 (14,0)	10,0 (12,0)	0,8	1,2	1,0
Seigle d'automne hybride	65	grain	85	13,0	18,0	13,0	3,1 (7,0)	3,9 (9,0)	3,5 (8,0)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,2 (5,0)	0,9	1,3	1,1
	75	paille	85	3,0	7,0	3,0	0,9 (2,0)	1,3 (3,0)	0,9 (2,0)	8,3 (10,0)	11,6 (14,0)	10,0 (12,0)	0,8	1,2	1,0
Epeautre	45	grain	85	14,0	18,0	16,0	3,1 (7,0)	3,9 (9,0)	3,5 (8,0)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,2 (5,0)	0,9	1,3	1,1
	70	paille	85	3,0	7,0	5,0	0,9 (2,0)	1,3 (3,0)	1,1 (2,5)	8,3 (10,0)	11,6 (14,0)	10,0 (12,0)	0,8	1,2	1,0
Triticale d'automne	60	grain	85	15,0	20,0	16,0	3,1 (7,0)	4,8 (11,0)	3,1 (7,2)	4,1 (4,9)	5,8 (7,0)	4,1 (4,9)	0,8	1,2	0,9
	75	paille	85	3,3	10,0	3,3	0,6 (1,4)	1,5 (3,5)	0,6 (1,4)	8,3 (10,0)	14,9 (18,0)	14,9 (18,0)	0,6	0,9	0,6
Triticale de printemps	55	grain	85	15,0	20,0	16,0	3,1 (7,0)	4,8 (11,0)	3,1 (7,2)	4,1 (4,9)	5,8 (7,0)	4,1 (4,9)	0,8	1,2	0,9
	70	paille	85	3,3	10,0	3,3	0,6 (1,4)	1,5 (3,5)	0,6 (1,4)	8,3 (10,0)	14,9 (18,0)	14,9 (18,0)	0,6	0,9	0,6

Culture	Rendement du produit récolté dt/ha	Produit	Teneur en MS %	Teneurs en éléments nutritifs (kg/t de matière fraîche)											
				N			P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )			K (K <sub>2</sub> O)			Mg		
				inf.	sup.	val.	inf.	sup.	val.	inf.	sup.	val.	inf.	sup.	val.
Amidonner, engrain	25	grain	85	17,0	27,0	22,0	2,6 (6,0)	4,4 (10,0)	3,5 (8,0)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,2 (5,0)	0,8	2,0	1,4
	45	paille	85	3,0	5,0	4,0	0,9 (2,0)	1,7 (4,0)	1,3 (3,0)	5,8 (7,0)	9,1 (11,0)	7,5 (9,0)	0,4	0,8	0,6
Millet	35	grain	85	15,2	18,4	16,6	2,4 (5,5)	3,2 (7,3)	2,8 (6,4)	1,8 (2,2)	2,7 (3,3)	2,4 (2,9)	0,9	1,4	1,2
	45	paille	85	9,3	11,6	10,7	1,3 (3,0)	3,3 (7,6)	2,4 (5,5)	12,6 (15,2)	25,3 (30,5)	18,8 (22,7)	1,8	2,7	2,4
Maïs grain	100	grain	85	11,0	15,0	13,0	1,7 (4,0)	3,5 (8,0)	2,6 (5,9)	3,3 (4,0)	4,6 (5,6)	3,3 (4,0)	0,6	1,4	0,9
	110	paille	85	4,0	8,0	7,3	1,0 (2,4)	1,9 (4,4)	1,1 (2,4)	11,6 (14,0)	24,9 (30,0)	14,5 (17,4)	0,7	1,9	1,3
Maïs d'ensilage <sup>1</sup>	185	plante entière	100	10,0	15,0	11,8	1,7 (4,0)	3,1 (7,0)	2,1 (4,8)	8,3 (10,0)	17,4 (21,0)	10,8 (13,0)	0,9	1,5	1,3
Maïs vert <sup>1</sup>	60	plante entière	100	14,0	24,0	19,0	2,4 (5,5)	3,3 (7,5)	2,8 (6,5)	18,3 (22,0)	26,6 (32,0)	22,4 (27,0)	0,8	1,2	1,0
Pomme de terre consommation et industrielle	450	tubercules	22	2,2	3,8	3,0	0,4 (1,0)	0,9 (2,0)	0,6 (1,3)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,5 (5,4)	0,2	0,2	0,2
	200	fanes	14	0,9	1,9	1,4	0,1 (0,3)	0,3 (0,7)	0,2 (0,5)	3,3 (4,0)	7,5 (9,0)	5,4 (6,5)	0,2	0,5	0,4
Pomme de terre primeur	300	tubercules	18	1,7	2,9	2,3	0,4 (1,0)	0,9 (2,0)	0,7 (1,5)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,2 (5,0)	0,2	0,2	0,2
	200	fanes	8	2,5	4,1	3,3	0,2 (0,5)	0,4 (0,9)	0,3 (0,7)	3,3 (4,0)	8,3 (10,0)	5,8 (7,0)	0,3	0,8	0,6
Pomme de terre plant	250	tubercules	18	1,7	2,9	2,3	0,4 (1,0)	0,9 (2,0)	0,7 (1,5)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,2 (5,0)	0,2	0,2	0,2
	200	fanes	8	2,5	4,1	3,3	0,2 (0,5)	0,4 (0,9)	0,3 (0,7)	3,3 (4,0)	8,3 (10,0)	5,8 (7,0)	0,3	0,8	0,6
Betterave sucrière	900	racines	22	1,2	2,5	1,2	0,3 (0,6)	0,4 (1,0)	0,3 (0,7)	1,7 (2,0)	3,3 (4,0)	1,7 (2,0)	0,2	0,4	0,3
	475	feuilles et collets	15	2,0	4,0	3,3	0,3 (0,6)	0,9 (2,0)	0,3 (0,7)	4,2 (5,0)	5,8 (7,0)	5,2 (6,3)	0,4	1,0	0,9
Betterave fourragère	175	racines <sup>1</sup>	100	9,0	13,0	11,0	1,7 (4,0)	2,6 (6,0)	2,2 (5,0)	12,5 (15,0)	17,4 (21,0)	14,9 (18,0)	1,1	1,5	1,3
	400	feuilles	15	2,0	4,5	3,5	0,3 (0,6)	0,4 (1,0)	0,3 (0,8)	5,0 (6,0)	6,6 (8,0)	5,8 (7,0)	0,5	1,3	0,9
Colza d'automne	35	principal	90	26,0	34,0	26,1	5,7 (13,0)	8,3 (19,0)	6,4 (14,6)	6,6 (8,0)	9,1 (11,0)	7,1 (8,5)	2,0	3,2	2,4
	90	secondaire	85	5,0	10,0	7,0	0,9 (2,0)	1,7 (4,0)	0,9 (2,0)	10,3 (12,4)	14,9 (18,0)	10,3 (12,4)	0,6	2,0	0,6
Colza de printemps	25	principal	90	26,0	34,0	26,1	5,7 (13,0)	8,3 (19,0)	6,4 (14,6)	6,6 (8,0)	9,1 (11,0)	7,1 (8,5)	2,0	3,2	2,6
	45	secondaire	85	5,0	10,0	7,0	0,9 (2,0)	1,7 (4,0)	0,9 (2,0)	10,3 (12,4)	14,9 (18,0)	10,3 (12,4)	1,0	2,0	1,5
Tournesol	30	grain	85	28,0	35,0	31,5	3,9 (9,0)	5,7 (13,0)	4,8 (11,0)	6,0 (7,2)	8,0 (9,6)	7,0 (8,4)	2,3	3,7	3,0
	60	paille	60	8,0	10,0	9,0	1,1 (2,5)	1,2 (2,8)	1,2 (2,7)	45,7 (55,0)	56,4 (68,0)	51,0 (61,5)	6,5	8,5	7,5
Chanvre oléagineux	13	grain	90	40,0	52,0	46,0	8,7 (20,0)	13,1 (30,0)	10,9 (25,0)	5,8 (7,0)	12,5 (15,0)	9,1 (11,0)	4,1	6,7	5,4
	60	paille	85	7,0	11,0	9,0	1,3 (3,0)	2,2 (5,0)	1,7 (4,0)	8,3 (10,0)	14,9 (18,0)	11,6 (14,0)	1,0	2,0	1,5

<sup>1</sup> Rendement et teneurs se référant à la matière sèche (MS).

Culture	Rendement du produit récolté dt/ha	Produit	Teneur en MS %	Teneurs en éléments nutritifs (kg/t de matière fraîche)											
				N			P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )			K (K <sub>2</sub> O)			Mg		
				inf.	sup.	val.	inf.	sup.	val.	inf.	sup.	val.	inf.	sup.	val.
Chanvre fibre	100	principal	85	2,0	4,0	3,0	0,9 (2,0)	1,7 (4,0)	1,3 (3,0)	5,8 (7,0)	9,1 (11,0)	7,5 (9,0)	0,3	0,7	0,5
	40	secondaire	90	23,0	32,0	27,5	5,2 (12,0)	7,8 (18,0)	6,5 (15,0)	16,6 (20,0)	29,1 (35,0)	22,8 (27,5)	3,0	7,0	5,0
Lin oléagineux	20	grain	90	45,0	64,0	54,5	3,9 (9,0)	6,5 (15,0)	5,2 (12,0)	5,8 (7,0)	10,0 (12,0)	7,9 (9,5)	0,3	0,7	0,5
	25	paille	85	4,0	8,0	6,0	1,7 (4,0)	2,6 (6,0)	2,2 (5,0)	10,8 (13,0)	19,1 (23,0)	14,9 (18,0)	0,5	1,2	0,9
Lin fibre	45	grain	85	8,0	12,0	10,0	2,6 (6,0)	3,5 (8,0)	3,1 (7,0)	12,5 (15,0)	20,8 (25,0)	16,6 (20,0)	1,0	3,0	2,0
	15	paille	90	45,0	64,0	54,5	3,9 (9,0)	6,5 (15,0)	5,2 (12,0)	5,8 (7,0)	10,0 (12,0)	7,9 (9,5)	0,3	0,7	0,5
Roseau de Chine <sup>1</sup>	200	plante entière	100	1,8	2,4	2,1	0,3 (0,8)	0,5 (1,1)	0,4 (1,0)	3,7 (4,5)	5,6 (6,7)	4,6 (5,6)	0,2	0,3	0,3
Kenaf <sup>1</sup>	50	plante entière	100	15,0	25,0	20,0	3,9 (9,0)	6,5 (15,0)	5,2 (12,0)	10,0 (12,0)	16,6 (20,0)	13,3 (16,0)	1,0	3,0	2,0
Pois protéagineux	40	grain	85	30,0	40,0	35,0	3,5 (8,0)	5,2 (12,0)	4,4 (10,0)	8,3 (10,0)	11,6 (14,0)	10,0 (12,0)	0,9	1,5	1,2
	50	paille	85	16,0	24,0	20,0	2,2 (5,0)	4,4 (10,0)	3,3 (7,5)	10,8 (13,0)	15,8 (19,0)	13,3 (16,0)	1,8	2,6	2,2
Féverole	40	grain	85	30,0	50,0	40,0	4,8 (11,0)	7,4 (17,0)	6,1 (14,0)	8,3 (10,0)	14,9 (18,0)	11,6 (14,0)	2,0	3,0	2,5
	45	paille	85	20,0	40,0	30,0	1,3 (3,0)	1,7 (4,0)	1,5 (3,5)	12,5 (15,0)	20,8 (25,0)	16,6 (20,0)	2,8	3,8	3,3
Soja	30	grain	85	45,0	75,0	60,0	4,4 (10,0)	7,8 (18,0)	5,1 (11,7)	12,5 (15,0)	19,1 (23,0)	16,0 (19,3)	2,0	3,0	2,0
	30	paille	85	25,0	45,0	35,0	4,4 (10,0)	6,5 (15,0)	5,1 (11,7)	16,6 (20,0)	33,2 (40,0)	17,8 (21,4)	2,9	8,0	2,9
Lupin doux	30	grain	88	45,0	65,0	55,0	3,5 (8,0)	5,2 (12,0)	4,4 (10,0)	9,1 (11,0)	13,3 (16,0)	11,2 (13,5)	1,6	2,4	2,0
	30	paille	85	25,0	45,0	35,0	1,3 (3,0)	2,2 (5,0)	1,7 (4,0)	12,5 (15,0)	20,8 (25,0)	16,6 (20,0)	3,0	5,0	4,0
Engrais vert <sup>1</sup> (légumineuse)	35	plante entière	100	34,1	49,4	43,6	3,0 (6,9)	5,8 (13,3)	4,5 (10,3)	22,8 (27,5)	41,2 (49,6)	29,1 (35,1)	1,9	3,4	2,7
Engrais vert <sup>1</sup> (non légumineuse)	35	plante entière	100	10,6	38,6	24,2	2,7 (6,2)	10,2 (23,4)	3,9 (8,9)	16,1 (19,4)	64,8 (78,1)	40,9 (49,3)	1,1	6,1	2,2
Dérobées <sup>1</sup> (par utilisation)	25	plante entière	100	24,0	32,0	28,0	3,5 (8,0)	4,8 (11,0)	4,1 (9,5)	20,8 (25,0)	37,4 (45,0)	29,1 (35,0)	2,0	3,0	2,5
Tabac Burley <sup>1</sup>	25	feuilles	100	25,0	35,0	30,0	2,8 (6,5)	3,5 (8,0)	3,2 (7,3)	33,2 (40,0)	49,8 (60,0)	41,5 (50,0)	2,3	3,3	2,8
	30	troncs	100	20,0	26,0	23,0	2,8 (6,5)	3,5 (8,0)	3,2 (7,3)	29,1 (35,0)	45,7 (55,0)	37,4 (45,0)	1,5	2,5	2,0
Tabac Virginie <sup>1</sup>	25	feuilles	100	20,0	30,0	25,0	2,2 (5,0)	2,6 (6,0)	2,4 (5,5)	33,2 (40,0)	45,7 (55,0)	39,4 (47,5)	1,5	2,5	2,0
	25	troncs	100	8,0	12,0	10,0	3,3 (7,5)	4,1 (9,5)	3,7 (8,5)	33,2 (40,0)	49,8 (60,0)	41,5 (50,0)	3,0	5,0	4,0
Riz	60	grains		9,0	13,0	11,0	2,6 (4,0)	3,5 (8,0)	3,0 (6,0)	3,3 (4,0)	5,8 (7,0)	4,6 (5,5)	0,6	1,2	0,9
	60	paille		6,0	7,0	6,5	0,9 (2,0)	1,7 (4,0)	1,3 (3,0)	10,8 (13,0)	23,2 (28,0)	17,0 (20,5)	1,2	2,4	1,8

<sup>1</sup> Rendement et teneurs se référant à la matière sèche (MS).

