

3/ Analyses de plantes

Sokrat Sinaj¹, Guillaume Blanchet¹, Selma Cadot¹, Thomas Kuster²,
Raphaël Charles¹ et Bernard Jeangros¹

¹ Agroscope, 1260 Nyon, Suisse

² Agroscope, 8820 Wädenswil, Suisse

Renseignements: sokrat.sinaj@agroscope.admin.ch

Table des matières

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

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

1. Introduction

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

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

2. Principes généraux concernant la nutrition des plantes

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

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

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

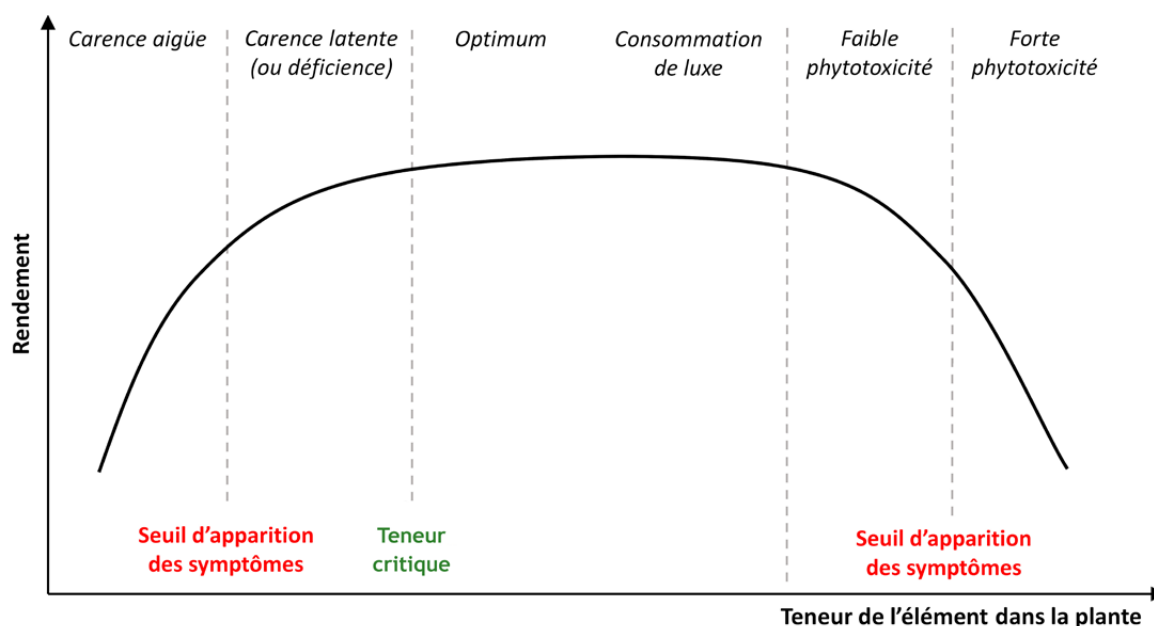


Figure 1. Courbe théorique du rendement de culture en fonction de la teneur d'un élément nutritif dans les tissus de la plante (adaptée de Marschner 2012).

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

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

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

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

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

éléments sont le plus souvent déterminées, mais dans certains cas, les analyses ne concernent que certaines formes spécifiques des éléments [par ex. NO_3^- pour l'azote (N), SO_4^{2-} pour le soufre (S)], car elles peuvent refléter plus précisément le statut de nutrition des plantes pour ces éléments (Marschner 2012). En fonction du type de culture en place (plantes annuelles ou pérennes), l'analyse de plantes pourra concerner toute la partie aérienne de la plante, les feuilles, les constituants spécifiques des feuilles (pétioles, limbes, nervures) ou encore les fruits. Les analyses en laboratoire nécessitent un investissement financier et un travail relativement important (préparation et envoi des échantillons, coût de l'analyse, etc.), mais cette méthode reste la plus fiable pour caractériser précisément l'état de nutrition de la plante pour chaque élément. Dans le cadre de la gestion de la fertilisation azotée, elle peut aussi permettre d'ajuster les prochains apports en fonction du stade de développement des végétaux au moment du prélèvement des échantillons. Pour les autres éléments, l'ajustement de la fertilisation s'effectuera en prévision des années à venir.

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

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

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

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

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

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

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

4. Interprétation des résultats d'analyses de plantes

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

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

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

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

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

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

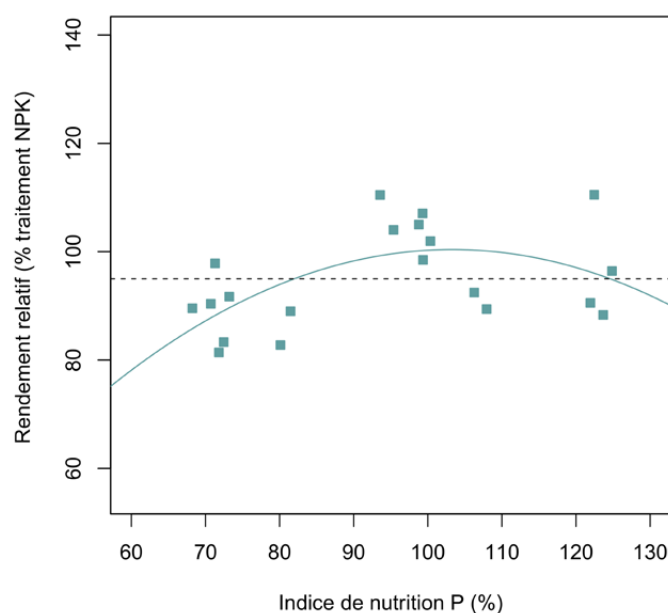


Figure 2. Rendement relatif en fonction de l'indice de nutrition du P pour du blé d'automne cultivé à Changins (Cadot *et al.* sous presse). Un rendement relatif de 100% correspond au rendement obtenu avec une fertilisation NPK telle que préconisée par les DBF (Sinaj *et al.* 2009).

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

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

¹ MS: matière sèche.

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

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

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

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

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

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

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

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

5. Complémentarité entre analyses de plantes et analyses de sol

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

A l'instar des relations entre le rendement d'une culture et la teneur en éléments nutritifs dans la plante (indices de nutrition), la relation entre le rendement d'une culture et la teneur d'un élément nutritif dans le sol, par exemple le P disponible, peut servir à établir le seuil critique pour interpréter cette teneur, c'est-à-dire la teneur minimale dans le sol qui permet d'atteindre 95 % au moins du rendement obtenu avec une fertilisation NPK optimale. Dans un essai de longue durée situé à Changins, où le sol présente un pH neutre (pH-H₂O = 6,8) et des teneurs en argile et en matière organique de respectivement 54 % et 5 %, Cadot *et al.* (sous presse) ont mis en évidence des seuils critiques pour P-NaHCO₃ (Olsen *et al.* 1954), P-AAE10 et P-CO₂ (Agroscope 1996) de respectivement 11,9, 10,0 et 0,3 mg kg⁻¹ pour le maïs grain, de 14,7, 12,1 et 0,3 mg kg⁻¹ pour le blé d'automne et de 15,6, 15,2 et 0,8 pour le colza (figure 3). Selon la version précédente des recommandations (Sinaj *et al.* 2009), de telles teneurs en P-AAE10 auraient conduit, pour les conditions de cet essai, à une augmentation de la norme de fertilisation P. Ces résultats soulignent la nécessité pour la recherche d'étudier ces seuils critiques pour d'autres conditions pédoclimatiques et d'autres cultures, avant de pouvoir généraliser le conseil de fertilisation sur la base de relations précises entre les teneurs en nutriments disponibles dans le sol, les teneurs dans les plantes et les rendements des cultures.

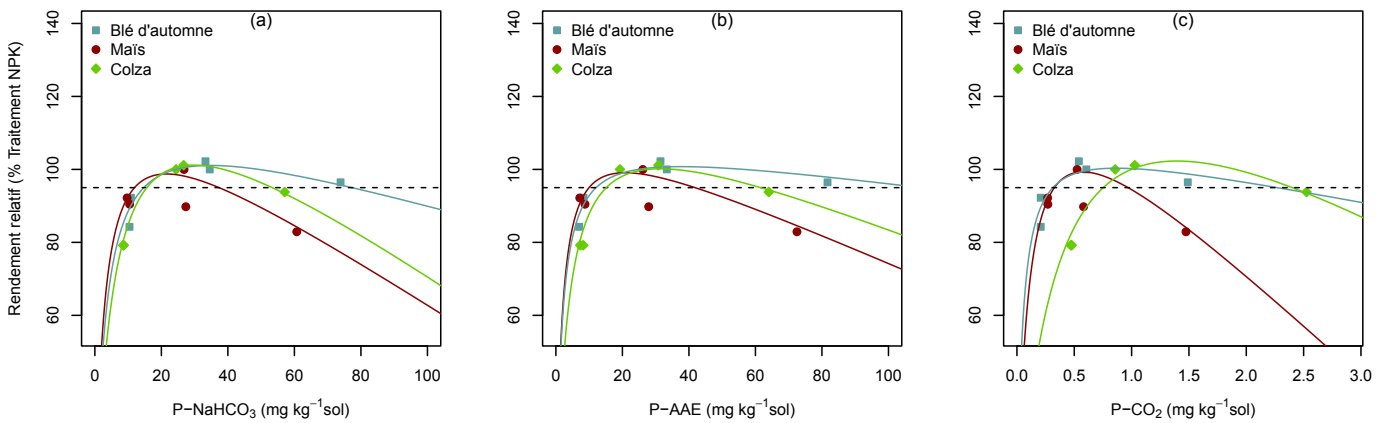


Figure 3. Rendement relatif du blé d'automne, du maïs grain et du colza en fonction du P disponible dans le sol (Cadot et al. sous presse). Ces courbes ont été établies dans les conditions pédoclimatiques de Changins. Trois méthodes d'extraction différentes ont été employées pour l'évaluation du P disponible: (a) méthode NaHCO_3 (P-NaHCO_3 , internationalement reconnue), (b) méthode AAE10 (P-AAE) et (c) méthode $\text{H}_2\text{O-CO}_2$ (P-CO_2) (b & c: méthodes de référence utilisées en Suisse). Un rendement relatif de 100 % correspond au rendement obtenu avec une fertilisation NPK telle que préconisée par les DBF (Sinaj et al. 2009).

6. Bibliographie

- Agroscope, 1996. Méthodes de référence des stations de recherche Agroscope, Volume 1: Analyse de terre et du substrat pour conseil de fumure, Edition 2015.
- American Agricultural Laboratory, 2013. Plant Tissue Interpretative Guidelines. Accès: www.olsenlab.com.
- Asher C. J. & Loneragan J. F., 1967. Response of plants to phosphate concentration in solution culture. I. Growth and phosphorus content. *Soil science* 103, 225–233.
- Bélangier G., Ziadi N., Pageau D., Grant C., Lafond J. & Nyiraneza J., 2015. Shoot Growth, Phosphorus-Nitrogen Relationships, and Yield of Canola in Response to Mineral Phosphorus Fertilization. *Agronomy Journal* 107, 1458–1464.
- Cadot S., Bélangier G., Ziadi N., Morel C. & Sinaj S., 2017. Yield response and critical plant and soil phosphorus for wheat, maize, and rapeseed after 44 years of phosphorus fertilization. *Agric. Ecosyst. Environ.* (in press).
- Campbell C. R. (ed), 2000. Reference Sufficiency Ranges for Plant Analysis in the Southern Region of the United States. Southern Cooperative Series Bulletin 394. Version mise à jour en 2013. Accès: <http://www.ncagr.gov/agronomi/saaesd/scsb394.pdf> [4. 5. 2017].
- Colenne C., Meynard J. M., Réau R., Justes E. & Merrien A., 1998. Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Oilseed Rape. *Annals of Botany* 81, 311–317.
- Debaeke P., van Oosterom E. J., Justes E., Champolivier L., Merrien A., Aguirrezabalaga L.A.N., González-Dugo V., Massingnam A.M. & Montemurro F., 2012. A species-specific critical nitrogen dilution curve for sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Field Crops research* 136, 76–84.
- Duru M. & Théliier-Huché L., 1997. N and P-K status of herbage: use for diagnosis of grasslands. In: INRA (Ed.), Diagnostic Procedures for Crop N Management and Decision Making, Paris (Les Colloques n° 82), 125–138.
- Farruggia A., Théliier-Huché L., Violleau S., Lebrun J. M. & Besnard A., 2000. L'analyse d'herbe pour piloter la fertilisation phosphatée et potassique des prairies. Exemples d'application de la méthode. *Fourrages* 164, 447–459.
- Flénet F., Guérif M., Boiffin J., Dorvillez D., Champolivier L., 2006. The critical N dilution curve for linseed (*Linum usitatissimum* L.) is different from other C3 species. *European Journal of Agronomy* 24, 367–373.
- Greenwood D. J., Lemaire G., Gosse G., Cruz P., Draycott A. & Neeteson J. J., 1990. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. *Annals of Botany* 66, 425–436.
- Hermann A. & Tube F., 2004. The Range of the Critical Nitrogen Dilution Curve for Maize (*Zea mays* L.) Can Be Extended Until Silage Maturity. *Agronomy Journal* 96, 1131–1138.
- Justes E., Mary B., Meynard J.-M., Machet J.-M. & Théliier-Huché L., 1994. Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Wheat Crops. *Annals of Botany* 74, 397–407.
- Lemaire G., Gastal F. & Salette J., 1989. Analysis of the effect of N nutrition on dry matter yield of a sward by reference to potential yield and optimum N content. In: Proceedings of the 16th International Grassland Congress. Nice. France. 179–180.
- Marschner P., 2012. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Troisième édition. Editions Academic Press, London, UK. 672 p.
- Neely H. L., Koenig R. T., Miles C. A., Koenig T. C. & Karlsson M. G., 2010. Diurnal Fluctuation in Tissue Nitrate Concentration of Field-grown Leafy Greens at Two Latitudes. *HortScience* 45 (12), 1815–1818.
- Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe F. S. & Dean L. A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. In U.S. Dept. of Agric., Circ. 939, Washington DC.
- Piekielek W. P & Fox R. H., 1992. Use of a chlorophyll meter to predict sidedress nitrogen requirements for maize. *Agronomy Journal* 84, 59–65.

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

7. Liste des tableaux

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

8. Liste des figures

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