



## Méthodes suisses de détermination des teneurs du sol en phosphore, potassium, magnésium et calcium assimilables par les plantes

### Auteur-e-s

Juliane Hirte<sup>1</sup>, Frank Liebisch<sup>1</sup>, Olivier Heller<sup>1</sup>, Peter Weisskopf<sup>1</sup>, Irene Weyermann<sup>2</sup>, Philipp Baumann<sup>3</sup>, Armin Keller<sup>3</sup> et Diane Bürge<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Agroscope

<sup>2</sup> Agridea

<sup>3</sup> Centre de compétences sur les sols



## Impressum

---

Éditeur	Agroscope Reckenholzstrasse 191 8046 Zürich <a href="http://www.agroscope.ch">www.agroscope.ch</a>
Renseignements	<a href="mailto:juliane.hirte@agroscope.admin.ch">juliane.hirte@agroscope.admin.ch</a>
Rédaction	Juliane Hirte
Mise en page	Müge Yildirim
Photo de couverture	Diane Bürge (Agroscope, Image gauche) Hansueli Zbinden (Agroscope, Image centre) Philipp Baumann (Kobo, Image droite)
Copyright	© Agroscope 2022
DOI	<a href="https://doi.org/10.34776/as129f">https://doi.org/10.34776/as129f</a>

---

### Exclusion de responsabilité

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

---

## Table des matières

<b>Résumé</b> .....	<b>4</b>
<b>1 Contexte</b> .....	<b>5</b>
<b>2 Récapitulatif des méthodes de référence</b> .....	<b>6</b>
2.1 Prélèvement d'échantillon .....	6
2.2 Détermination analytique.....	6
2.3 Interprétation selon les PRIF .....	7
<b>3 Problématique</b> .....	<b>8</b>
3.1 Prélèvement d'échantillon .....	8
3.2 Détermination analytique.....	9
3.3 Interprétation selon les PRIF .....	14
<b>4 Propositions de solutions</b> .....	<b>15</b>
4.1 Prélèvement d'échantillon .....	15
4.2 Détermination analytique.....	15
4.3 Interprétation selon les PRIF .....	16
<b>5 Conclusion</b> .....	<b>18</b>
<b>6 Bibliographie</b> .....	<b>20</b>

## Résumé

Pour caractériser l'état nutritif des sols à des fins de production végétale, les teneurs en phosphore, potassium, magnésium et calcium assimilables par les plantes peuvent être déterminées par différentes méthodes. Cette publication donne un aperçu des méthodes établies en Suisse, du prélèvement d'échantillons de sol à l'interprétation des teneurs en éléments nutritifs du sol selon les Principes de la fertilisation des cultures agricoles (PRIF), en passant par la préparation des échantillons et la détermination analytique des éléments nutritifs. Elle (i) décrit les possibilités et les limites actuelles des méthodes, (ii) présente des possibilités d'amélioration concrètes et enfin (iii) esquisse le potentiel de développement futur. Cet aperçu peut aider à développer les plans d'exploitation dans la pratique, l'exécution des mesures de politique agricole dans le cadre des prestations écologiques requises (PER) et du monitoring environnemental.

# 1 Contexte

La quantité d'éléments nutritifs assimilables par les plantes dans le sol est estimée à partir d'un échantillon de sol prélevé sur le terrain, par extraction et mesure des éléments nutritifs, puis interprétation des valeurs mesurées. Il ne s'agit pas de mesurer la teneur totale en éléments nutritifs du sol, mais uniquement la part qui peut être mobilisée par les agents d'extraction utilisés. L'objectif est de représenter au mieux les pools d'éléments nutritifs assimilables par les plantes. Les agents d'extraction légers représentent la solution du sol et mobilisent la part d'éléments nutritifs directement assimilables par les plantes. Les agents d'extraction plus puissants peuvent mettre en évidence des quantités d'éléments nutritifs disponibles à plus long terme et en partie fixés dans le sol. À l'aide de courbes d'étalonnage établies à la suite d'essais sur le terrain, les quantités d'éléments nutritifs extractibles sont mises en relation avec les performances des cultures, par exemple avec le rendement ou avec des paramètres de qualité, afin de fournir des informations sur l'état de fertilité du sol pour la nutrition des plantes. Des tableaux d'interprétation pour le phosphore, le potassium et le magnésium sont disponibles dans les PRIF pour différentes méthodes d'extraction et propriétés du sol (Flisch et al., 2017).

La détermination des teneurs en éléments nutritifs du sol assimilables par les plantes est donc particulièrement importante pour établir les plans de fumure. D'autres domaines d'application sont la caractérisation des sites, l'exécution des mesures de politique agricole dans le cadre des PER et le monitoring agro-environnemental (encadré 1). Les méthodes de référence suisses contiennent des informations sur la réalisation des analyses de sol pour différents domaines d'application et forment la base d'autres sources d'information (encadré 2).

Encadré 1: Domaines d'application de la détermination du phosphore, du potassium, du magnésium et du calcium dans le sol.

## **Plan de fumure:**

Pour un plan de fumure ciblé, il est nécessaire de connaître les éléments nutritifs du sol assimilables par les plantes ainsi que d'autres caractéristiques du site qui ont une influence sur la disponibilité des éléments nutritifs et la capacité d'absorption de ces derniers par les plantes. Selon les PRIF, il est possible de déterminer des pools de phosphore, de potassium et de magnésium directement assimilables par les plantes, ainsi que des pools de réserve de phosphore, de potassium, de magnésium et de calcium. Pour établir les recommandations de fumure, il faut en outre disposer d'informations sur le pH, la granulométrie (texture: teneur en argile et en limon) et la teneur en carbone organique (ou humus) du sol. Des concepts de fumure alternatifs comme ceux de Kinsey ou de Niederhäuser tiennent en outre compte du rapport entre les cations basiques dans le sol et les teneurs en autres éléments nutritifs essentiels pour les plantes tels que le soufre, le fer, le manganèse et le bore.

## **Prestations écologiques requises pour l'obtention des paiements directs:**

Afin d'avoir droit à des paiements directs dans le cadre des PER, il faut effectuer des analyses de sol au moins tous les 10 ans sur chaque parcelle. Les paramètres à déterminer obligatoirement sont le phosphore et le potassium. Pour pouvoir les interpréter, il faut également déterminer le pH, la granulométrie et la teneur en carbone organique. Les données anonymisées sont fournies chaque année à l'OFAG par des laboratoires environnementaux agréés afin d'évaluer l'évolution de l'état du phosphore et du potassium dans les sols. La livraison des données dans les délais par les laboratoires est une condition préalable au renouvellement de leur agrément.

## **Monitoring agro-environnemental:**

Les données d'analyse de sol PER sont également utilisées pour calculer l'indicateur agro-environnemental «phosphore dans le sol». Le calcul se base actuellement sur les pools de phosphore assimilables par les plantes. Pour estimer le risque de transfert du phosphore provenant du sol vers les eaux en raison de l'érosion, du ruissellement et du lessivage, il serait nécessaire de disposer d'informations supplémentaires sur la teneur totale en phosphore du sol, le risque d'érosion et le raccordement de la parcelle au système de drainage.

Encadré 2: Sources d'information sur les méthodes de détermination des teneurs du sol en phosphore, potassium, magnésium et calcium assimilables par les plantes avec éditeurs/trices, année et lien hypertexte.

**Bases:**

- **Méthodes de référence suisses.** Agroscope et autres. En cours de révision. [www.agroscope.ch/methodes-references](http://www.agroscope.ch/methodes-references)
- **Principes de la fertilisation des cultures agricoles (PRIF).** Agroscope. 2017. [www.prif.ch](http://www.prif.ch)

**Ordonnances et directives:**

- **Ordonnance sur les paiements directs (OPD).** Office fédéral de l'agriculture (OFAG). 2013. Commentaire et instructions 2021. [www.blw.admin.ch/blw/fr/home/instrumente/direktzahlungen.html](http://www.blw.admin.ch/blw/fr/home/instrumente/direktzahlungen.html)
- **Directives KIP pour les PER.** Groupe de coordination Directives Tessin et Suisse alémanique. 2021. <https://agridea.abacuscity.ch/de/A~1214~1/3~428200~Shop/Publikationen/Aufzeichnungen-Nachweis/%C3%96kologischer-Leistungsnachweis-%C3%96LN/KIP-Richtlinien-Vollversion/Deutsch/Print-Papier>
- **Prestations écologiques requises (PER) règles techniques.** Groupement pour la production intégrée dans l'Ouest de la Suisse (PIOCH) et AGRIDEA. 2021. [agripedia.ch/per/dossier-per-romandie-2021/](http://agripedia.ch/per/dossier-per-romandie-2021/)

**Protocoles et fiches:**

- **Protocoles des laboratoires environnementaux et des agro-entrepreneurs.** Divers (voir tableau 2).
- **Fiche Analyses de sol pour les exploitations.** Institut de recherche de l'agriculture biologique FiBL. 2021. [www.fibl.org/de/shop/1158-bodenuntersuchung](http://www.fibl.org/de/shop/1158-bodenuntersuchung)
- **Fiche Guide de prélèvements pour analyses de terre.** AGRIDEA, Agroscope, OFAG. En cours d'élaboration.

## 2 Récapitulatif des méthodes de référence

### 2.1 Prélèvement d'échantillon

Selon les méthodes de référence suisses (encadré 3), les échantillons de sol sont prélevés après la récolte ou la dernière coupe, donc généralement en automne, et si possible toujours après la même culture dans la rotation. L'unité d'échantillonnage est une surface exploitée de manière uniforme qui correspond normalement à une parcelle. Il n'y a pas de taille de surface minimale ou maximale, mais lorsque les conditions du sol ne sont pas homogènes ou qu'il y a des différences manifestes en termes de croissance des plantes, il est recommandé de définir deux unités d'échantillonnage ou plus par parcelle. L'échantillon est prélevé à l'aide d'une tarière de faible diamètre (2-4 cm) et d'un récipient collecteur. Outre la méthode manuelle avec une tarière et un seau, il existe des méthodes d'échantillonnage standardisées, parfois mécaniques, par exemple avec le set Swiss Sampler (LBU) ou des échantillonneurs hydrauliques ([boden-analyse.ch](http://boden-analyse.ch), [bodenproben.ch](http://bodenproben.ch), Landor). Par unité d'échantillonnage, on effectue 20 à 25 prélèvements répartis régulièrement sur la surface à une profondeur de 0 à 10 cm (herbages) ou de 0 à 20 cm (grandes cultures). Les prélèvements sont ensuite rassemblés dans un récipient puis mélangés pour constituer un échantillon homogène que l'on place dans un sac d'échantillonnage propre. Le sac d'échantillonnage clairement étiqueté doit être envoyé le plus rapidement possible au laboratoire.

### 2.2 Détermination analytique

Pour l'analyse des teneurs en éléments nutritifs, les échantillons de sol sont séchés à 40°C et tamisés à 2 mm afin d'éliminer les matières organiques telles que les racines et les résidus d'engrais de ferme ainsi que les pierres. En Suisse, les agents d'extraction légers généralement utilisés sont l'eau saturée en CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>), la solution de chlorure de calcium (CC) et l'eau (H<sub>2</sub>O10), tandis que les agents d'extraction plus forts sont l'acétate d'ammonium EDTA

(AAE10). Le choix de la méthode dépend du groupe de culture, de l'élément nutritif et du pool d'éléments nutritifs à extraire (tableau 1). Dans les extraits, on mesure les teneurs totales en potassium, magnésium et calcium, ainsi que la part minérale du phosphore. Pour interpréter les concentrations d'éléments nutritifs dans les extraits selon les PRIF, d'autres informations sur le sol sont nécessaires: le pH, la granulométrie et la teneur en carbone organique. Le pH est mesuré dans l'eau, la granulométrie est déterminée par la méthode de sédimentation et la teneur en carbone organique par la méthode du dichromate ou du gradient de température. En alternative, il est possible d'effectuer un contrôle visuel/tactile de l'échantillon pour estimer la granulométrie et la teneur en carbone organique dans le cadre des conseils de fumure et des analyses de sol PER.

Encadré 3: Aperçu des méthodes de référence suisses.

**Statut de référence:**

L'objectif des méthodes de référence est de mettre à disposition des méthodes obligatoires pour les conseils de fumure et diverses tâches d'exécution. Une méthode a un statut de référence lorsqu'elle est définie et validée pour un domaine d'application donné et que des schémas d'interprétation des résultats sont disponibles. Des méthodes bien définies et documentées garantissent la traçabilité des résultats sur de longues périodes et facilitent la comparaison des résultats de différents laboratoires.

**Domaines d'application:**

- Analyses d'éléments nutritifs pour les conseils de fumure et les PER
- Évaluation des polluants dans les échantillons de sol et d'engrais (selon l'Ordonnance sur les atteintes portées au sol OSol, l'Ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques ORRChim et l'Ordonnance sur le Livre des engrais OLen)

**Méthodes équivalentes et méthodes de recherche:**

Les méthodes qui, de toute évidence, donnent les mêmes résultats que les méthodes de référence peuvent également être utilisées. Elles offrent aux laboratoires une plus grande flexibilité et peuvent rendre les mesures moins coûteuses et faciliter la comparaison des résultats avec les données internationales. La preuve de l'équivalence est la réussite de l'essai interlaboratoire correspondant.

Les méthodes qui peuvent être utilisées dans les mêmes domaines d'application, mais qui n'ont pas le statut de référence, sont publiées en tant que méthodes de recherche.

**Publication:**

Les méthodes sont publiées depuis 1995. Elles ont été révisées en 2020 et sont disponibles gratuitement, publiquement, et sous forme électronique ([www.agroscope.ch/methodes-references](http://www.agroscope.ch/methodes-references)). Les méthodes sont élaborées, révisées et publiées par des représentants d'Agroscope, de l'OFAG, de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) et d'autres institutions et services spécialisés, ainsi que des représentants de laboratoires environnementaux. Les modifications sont annoncées à l'avance dans la Newsletter «Méthodes de référence» (inscription pour toutes les personnes intéressées via le site Internet).

## 2.3 Interprétation selon les PRIF

Afin d'estimer l'état de fertilité du sol, les concentrations en éléments nutritifs mesurées dans les extraits sont classées à l'aide de tableaux d'interprétation (Flisch et al., 2017). L'information complémentaire la plus importante est la teneur en argile, qui est répartie en cinq classes <10, 10-19,9, 20-29,9, 30-39,9, et ≥ 40% et qui, avec la concentration en éléments nutritifs dans l'extrait, donne des informations sur l'état de fertilité du sol. L'état de fertilité est jugé pauvre, médiocre, satisfaisant, riche ou très riche, et donc réparti dans les classes de fertilité A à E (tableau 8 dans Flisch et al., 2017). Pour déterminer les besoins de fumure, la fumure normalisée est multipliée par des facteurs de correction qui dépendent de l'état de fertilité du sol. Le facteur de correction maximal est de 1,5 pour les sols dont l'état de fertilité est pauvre, le facteur de correction minimal est de 0 pour les sols dont l'état de fertilité est très riche. Un facteur de correction de 1 correspond à une fertilisation normale ou à des apports d'entretien. Si le sol

présente une teneur en carbone organique  $\geq 5,8\%$  (teneur en humus  $\geq 10\%$ ), un facteur de correction de l'analyse est également appliqué (tableau 9 dans Flisch et al., 2017). En outre, le tableau d'interprétation du phosphore dans l'extrait de  $\text{CO}_2$  tient également compte des teneurs en argile et en sable du sol (tableau 10 dans Flisch et al., 2017). Il n'existe actuellement aucun tableau d'interprétation pour le phosphore avec la méthode d'extraction à  $\text{H}_2\text{O}_{10}$  pour les sols dont le pH est  $\leq 5,0$  ou  $\geq 7,8$ . Pour les sols calcaires (pH  $\geq 6,8$  ou  $\text{AAE}_{10}\text{-Ca} \geq 4000$  mg Ca/kg de sol), les tableaux d'interprétation du phosphore avec la méthode d'extraction  $\text{AAE}_{10}$  ne sont pas non plus valables (tableau 1). La raison en est que des quantités plus importantes de calcium dans le sol modifient les processus chimiques pendant l'extraction du phosphore avec l' $\text{AAE}_{10}$  et qu'il n'existe actuellement pas suffisamment de données pour déduire des courbes de réponse du rendement en fonction du pH pour le phosphore avec la méthode d'extraction  $\text{AAE}_{10}$ .

Tableau 1: Aperçu des méthodes d'extraction pour la détermination du phosphore, du potassium, du magnésium et du calcium dans le sol selon les méthodes de référence suisses.

Agent d'extraction		Élément nutritif	Pool d'éléments nutritifs	Groupe de cultures	Possibilité d'interprétation	Code des méthodes	
Désignation	Puissance*					Extraction	Mesure
$\text{CO}_2$	Légère	Phosphore, potassium	Directement assimilables par les plantes	Grandes cultures, herbages	Aucune restriction	$\text{CO}_2\text{-Ex}$	$\text{CO}_2\text{-K}$ , $\text{CO}_2\text{-P}$
CC	Légère	Magnésium	Directement assimilables par les plantes	Grandes cultures, herbages	Aucune restriction	$\text{CCMg-Ex}$	CC-Mg
$\text{H}_2\text{O}_{10}$	Légère	Phosphore, potassium, magnésium	Directement assimilables par les plantes	Cultures spéciales: légumes, fruits, petits fruits, vigne	Phosphore: pH du sol $\geq 5,0$ et $\leq 7,8$	$\text{H}_2\text{O}_{10}\text{-Ex}$	$\text{H}_2\text{O}_{10}\text{-K-Mg}$ , $\text{H}_2\text{O}_{10}\text{-P}$
$\text{AAE}_{10}$	Forte	Phosphore, potassium, magnésium, calcium	Réserve	Toutes	Phosphore, magnésium: pH du sol $\leq 6,8$	$\text{AAE}_{10}\text{-Ex}$	$\text{AAE}_{10}\text{-K-Ca-Mg}$ , $\text{AAE}_{10}\text{-P}$

\* Dans les PRIF, classé comme «doux» ou «agressif».

## 3 Problématique

### 3.1 Prélèvement d'échantillon

La méthode de prélèvement est sujette à incertitudes, car il existe aujourd'hui différentes sources qui fournissent des informations non homogènes ou parfois un manque de données. Alors que les exigences relatives à la représentativité de la surface et les recommandations concernant la période de prélèvement et l'intervalle de temps sont similaires quelles que soient les sources, les données relatives à la profondeur de prélèvement dans la couche arable, au diamètre de la tarière, au nombre de prélèvements par unité d'échantillonnage, à la taille de l'unité d'échantillonnage et à la subdivision de l'échantillon composé avant l'envoi au laboratoire varient considérablement (tableau 2).

Selon les méthodes de référence, la limite supérieure de l'échantillon de sol est fixée à 0 cm pour la plupart des cultures, alors qu'en Suisse romande, il est généralement recommandé de jeter les 2 cm supérieurs de l'échantillon de sol en raison d'une possible contamination par des restes d'engrais ou des résidus de récolte (tableau 2). Pour les éléments nutritifs peu mobiles comme le phosphore, dont la concentration diminue souvent beaucoup avec la profondeur du sol, cette pratique peut avoir des conséquences sur les teneurs mesurées dans l'échantillon de sol. En outre, il n'existe actuellement aucune recommandation sur la manière de traiter le sous-sol, sauf pour l'arboriculture et la viticulture, alors que les plantes cultivées couvrent en moyenne plus de 30% de leurs besoins en nutriments à partir du sous-sol (Kautz et al., 2013).



Le diamètre de la tarière, le nombre de prélèvements et leur répartition dans l'espace influencent aussi bien la représentativité de l'échantillon composé pour l'unité d'échantillonnage que la quantité de sol prélevée et la nécessité de fractionner l'échantillon composé avant de l'envoyer au laboratoire. Sur ce point, les informations fournies par les méthodes de référence sont elles-mêmes contradictoires: au moins 20 prélèvements doivent être effectués à l'aide d'une tarière de 2 à 4 cm de diamètre, ce qui donne un échantillon de 1,3 à 5 l ou d'environ 1,6 à 6,5 kg (densité de sol supposée de 1,3 g cm<sup>3</sup>). Bien que l'on s'efforce d'éviter de fractionner l'échantillon composé a posteriori, seule une quantité maximale de 1 kg de terre peut être envoyée au laboratoire pour analyse, les capacités étant limitées. Par conséquent, les informations fournies par les laboratoires concernant le nombre de prélèvements et le fractionnement de l'échantillon composé s'écartent largement des méthodes de référence (tableau 2). La plupart des sources d'information ne donnent toutefois pas d'indications précises sur la façon correcte de fractionner un échantillon composé, ce qui peut poser problème pour le prélèvement d'une partie d'un échantillon composé représentatif, en particulier dans les sols limoneux ou riches en argile. De même, les méthodes de référence ne contiennent pas d'indications sur les informations supplémentaires obligatoires sur la surface échantillonnée, comme par exemple la date de prélèvement, l'exploitation, l'affectation de la surface, la culture (ou le groupe de cultures) et la profondeur de prélèvement, de sorte que les procédures diffèrent ici aussi largement entre les laboratoires (tableau 2). Si, par exemple, les données relatives à la culture font défaut, il n'est pas possible d'en tirer des recommandations de fumure, car des facteurs de correction spécifiques à la culture sont appliqués pour le phosphore, le potassium et le magnésium.

Les PER sont soumises aux indications figurant dans les méthodes de référence, ainsi qu'à la règle selon laquelle les analyses de sol doivent être effectuées au moins tous les 10 ans (OFAG, 2020). Plusieurs parcelles contiguës présentant les mêmes conditions de sol et le même mode d'exploitation peuvent être regroupées lors du prélèvement d'échantillons. Ces indications figurent également dans les directives KIP ou les règles techniques PER (KIP, 2021; PIOCH, 2021). De plus, selon les directives KIP, l'analyse obligatoire ne s'applique qu'aux parcelles > 1 ha, tandis que les parcelles > 5 ha doivent être divisées en plusieurs unités d'échantillonnage (KIP, 2021), ce qui n'est toutefois pas confirmé dans l'OPD. Comme il y a un nombre relativement important de parcelles de moins de 1 ha en Suisse, les informations incohérentes sur l'obligation d'analyse peuvent créer une incertitude chez les chefs d'exploitation quant à la nécessité de réaliser ou non les analyses de sol pour les PER.

Pour utiliser les résultats d'analyse dans des instruments d'exécution et de planification (p. ex. planification du mode d'exploitation et d'utilisation des sols), il serait en outre nécessaire d'attribuer de manière univoque l'unité d'échantillonnage à une surface par géoréférencement. Pour estimer le risque de transfert du phosphore provenant du sol vers les eaux en raison de l'érosion, du ruissellement et du lessivage pour le monitoring agro-environnemental, il serait nécessaire de disposer d'informations sur le risque d'érosion et le raccordement de la parcelle au système de drainage. Ces informations ont déjà été modélisées à l'échelle de la Suisse (Bircher et al., 2019; Koch and Prasuhn, 2020), mais ne peuvent pas encore être mises en relation avec les analyses de sol PER car les résultats d'analyse ne peuvent pas être attribués aux surfaces.

## 3.2 Détermination analytique

Parmi les méthodes d'extraction légères, le CO<sub>2</sub> et la solution CC se sont imposées uniquement pour les groupes de grandes cultures et herbages, et le H<sub>2</sub>O<sub>10</sub> uniquement pour les cultures spéciales (tableau 1; Fleisch et al., 2017). Cette répartition des groupes de cultures ne repose toutefois sur aucune base scientifique, de sorte que des cultures comme les pommes de terre, les pois protéagineux ou les féveroles sont classées, selon leur mode de culture, aussi bien dans les grandes cultures que dans les cultures maraîchères et que les sols sont par conséquent analysés aussi bien avec la méthode CO<sub>2</sub> / CC qu'avec la méthode H<sub>2</sub>O<sub>10</sub>. Malgré les différences entre les méthodes au niveau du rapport sol/eau, du temps d'agitation et de la filtration, l'ordre de grandeur des éléments nutritifs extraits est similaire (Stünzi, 2006, 2007). Néanmoins, des conversions simples ne sont toujours pas possibles, car les corrélations sont influencées par d'autres propriétés du sol comme la teneur en calcaire ou en matière organique (Stünzi, 2006, 2007). Il est donc difficile de comparer les teneurs en éléments nutritifs du sol entre les différents groupes de cultures, ce qui complique l'évaluation des données d'analyse de sol PER. Des comparaisons avec des

études internationales pour les groupes grandes cultures et herbages ne sont également guère possibles (Steinfurth et al., 2021), car la méthode du CO<sub>2</sub> est utilisée exclusivement en Suisse. La recherche suisse utilise souvent d'autres méthodes d'extraction comme la méthode Olson ou la méthode du bicarbonate de sodium (p. ex. Demaria et al., 2005; Banerjee et al., 2019). Il serait donc utile d'avoir une méthode de détermination légère uniforme pour tous les groupes de cultures, également utilisée en dehors de la Suisse, aussi bien pour les besoins du monitoring environnemental et de l'aide à l'exécution que pour la recherche.

Tableau 2: Informations sur le prélèvement d'échantillons de terre végétale en plein champ selon les méthodes de référence suisses et les sources d'information des laboratoires environnementaux agréés pour les analyses de sol PER.

	Méthodes de référence / PRIF	Arenenberg	bodenproben.ch	Landor	Hepia	Labor Ins	LBU	Sol Conseil
Méthode	Manuelle	Manuelle ou mécanique via bodenproben.ch	Mécanique	Manuelle, manuelle standard ou mécanique	Manuelle	Manuelle ou mécanique via un partenaire	Manuelle standard ou mécanique via un partenaire	Manuelle ou mécanique via bodenproben.ch
Matériel	Tarière, seau	Tarière ou sonde, seau	Pelle Wintex	Tarière, seau, Swiss Sampler ou échantillonneur LANDOR	Tarière ou sonde, seau	Tarière, seau ou échantillonneur mécanique	Swiss Sampler ou échantillonneur mécanique	Tarière / bêche, seau
Exigences relatives à l'unité d'échantillonnage	Surface homogène	Surface homogène	Surface homogène, max. 5 ha	Surface homogène, max. 1.5 ha	Surface homogène	n.c.	Surface homogène	n.c.
Période	Entre la récolte et la fertilisation	Après la récolte et avant la fertilisation de la culture suivante, au moins 6 semaines après la dernière fumure	Après la récolte ou en hiver	Avant la fertilisation	Avant la fertilisation et le travail du sol	n.c.	n.c.	Après la récolte, au moins 2 mois après la fertilisation
Intervalle de temps	Dépend de la culture 4-6 / 5-10 ans	Plan de fumure: 4-6 / 5-10 ans, PER: au moins tous les 10 ans	Recommandation: 4-6, PER: au moins tous les 10 ans	4-6 ans	PER: au moins tous les 10 ans	Dépend de la culture 4-6 / 5-10 ans	n.c.	n.c.
Profondeur du sol [cm]								
Grandes cultures	0-20	0-20	0-20	0-20	2-20 <sup>1</sup>	0-20	0-20	2-20
Prairies permanentes et pâturages	0-10	0-10	0-10	0-10	n.c.	0-10	0-10	2-10
Production maraîchère	0-20	0-20	0-20	2-25	n.c.	0-25	0-25	2-20
Arboriculture et viticulture	2-25	2-25	2-25	2-25	n.c.	2-25	0-25	2-25
Culture annuelle/pluriannuelle de petits fruits	0-20 / 2-25	0-20 / 2-25	0-20 / 2-25	2-25	n.c.	0-20 / 2-25	n.c.	n.c.
Diamètre de l'échantillonneur/de la tarière [cm]	2-4	ca. 2	1.8	ca. 3-4	2.5	3	ca. 3	n.c.

Nombre de prélèvements	20-25	20-25	20-25	20-30	20	20	15-20	12-15
Répartition des prélèvements	Régulière	Régulière (en diagonale, en travers, surface test)	Selon une grille	En diagonale	Régulière (en diagonale, en travers)	En diagonale	En diagonale	Régulière (en travers, en diagonale)
Quantité de terre pour le laboratoire [kg]	1	0.5	0.5	0.5	1	1 Liter	0.3	1
Fractionnement de l'échantillon composé	Échantillon composé si possible complet	Effriter les prélèvements et bien les mélanger, prélever la quantité nécessaire sur l'échantillon composé	Échantillon composé complet	Prélever la quantité nécessaire sur l'échantillon composé	Effriter les prélèvements et bien les mélanger, prélever la quantité nécessaire sur l'échantillon composé	Prélever la quantité nécessaire sur l'échantillon composé	Bien mélanger l'échantillon dans le seau à l'aide de l'échantillonneur, prélever la quantité nécessaire sur l'échantillon composé	n.c.
Informations complémentaires	n.c.	Nom de la parcelle, date	Nom (et taille) de la parcelle, groupe de cultures, date	Nom et taille de la parcelle, culture, date	Nom de la parcelle, groupe de cultures, profondeur du sol, date	Altitude de l'exploitation, nom et taille de la parcelle, culture, précédent cultural, date	Nom et taille de la parcelle, groupe de cultures, culture, date	Nom de la parcelle, profondeur du sol, groupe de cultures, granulométrie (si connue), date
Référence <sup>2</sup>	3	4	5	6	7	8	9	10

<sup>1</sup> La profondeur d'échantillonnage recommandée est de 0 à 20 cm, les 2 cm supérieurs devant être jetés.

<sup>2</sup> Toutes les informations proviennent de sources d'information disponibles en ligne et ont été complétées après un contact personnel avec les responsables de laboratoire.

<sup>3</sup> [www.agroscope.ch/referenzmethoden](http://www.agroscope.ch/referenzmethoden); [www.grud.ch](http://www.grud.ch)

<sup>4</sup> [arenenberg.tg.ch/beratung/bodenlabor.html/350](http://arenenberg.tg.ch/beratung/bodenlabor.html/350)

<sup>5</sup> [bodenproben.ch](http://bodenproben.ch)

<sup>6</sup> [www.landor.ch/landor-services/beratung/boden-und-blattanalysen/](http://www.landor.ch/landor-services/beratung/boden-und-blattanalysen/)

<sup>7</sup> [www.hesge.ch/hepia/en/laboratoire/soil-analysis-laboratory](http://www.hesge.ch/hepia/en/laboratoire/soil-analysis-laboratory)

<sup>8</sup> [www.laborins.ch/service/bodenproben/](http://www.laborins.ch/service/bodenproben/); partenaire: [www.boden-analyse.ch](http://www.boden-analyse.ch); [www.agrischenk.ch/dienstleistungen/bodenanalyse/](http://www.agrischenk.ch/dienstleistungen/bodenanalyse/); [www.vetterli-foma.ch/bodenproben/](http://www.vetterli-foma.ch/bodenproben/); [www.schneider-thunstetten.ch/maschinelle-bodenprobe/](http://www.schneider-thunstetten.ch/maschinelle-bodenprobe/); [www.rsahli-agrar.ch/roland/index.php/de/unsere-programme/bodenanalyse](http://www.rsahli-agrar.ch/roland/index.php/de/unsere-programme/bodenanalyse)

<sup>9</sup> [www.ericsschweizer.ch/de/labor/bodenanalytik/](http://www.ericsschweizer.ch/de/labor/bodenanalytik/); partenaire: [www.boden-analyse.ch](http://www.boden-analyse.ch)

<sup>10</sup> [www.sol-conseil.ch](http://www.sol-conseil.ch)

La détermination des éléments nutritifs dans les extraits s'effectue à l'aide de différentes méthodes de mesure. Le choix de la méthode de mesure n'est pas important pour la détermination du potassium, du magnésium et du calcium; en revanche, pour les mesures du phosphore, la méthode influence considérablement la reproductibilité et la comparabilité des résultats (Stünzi, 2006). La photométrie permet essentiellement de saisir la part minérale du phosphore dans l'extrait, tandis que la mesure spectrométrique permet également de mesurer le phosphore organiquement lié. Comme ce dernier joue un rôle important dans la nutrition des plantes (Richardson et al., 2005), il semble logique de déterminer la teneur totale en phosphore dans l'extrait dans l'optique des conseils de fumure. La mesure spectrométrique présente en outre l'avantage de pouvoir déterminer simultanément plusieurs éléments dans l'extrait. Actuellement, il n'existe encore aucune méthode de référence ni aucun tableau d'interprétation pour le phosphore mesuré par spectrométrie.

Pour déterminer la granulométrie et la teneur en carbone organique, qui sont nécessaires à l'interprétation des teneurs en éléments nutritifs du sol, il existe une alternative à la détermination analytique: le test tactile / visuel, tant pour la recommandation de fumure que pour l'analyse de sol PER. L'imprécision de cette méthode (figure 1) peut avoir de graves conséquences sur l'évaluation de l'état de fertilité d'un sol et sur les facteurs de correction pour la recommandation de fumure. Par exemple, si la teneur en argile est légèrement mal estimée et qu'une classe est sous-estimée, l'état de fertilité peut dans certains cas être classé comme médiocre (B) au lieu de très riche (E) et le facteur de correction peut donc être déplacé de 0 à 1,2 (tableau 16 Vigne dans Flisch et al., 2017). Par conséquent, le contrôle tactile / visuel ne convient pas pour les recommandations agronomiques et pour l'aide à l'exécution.

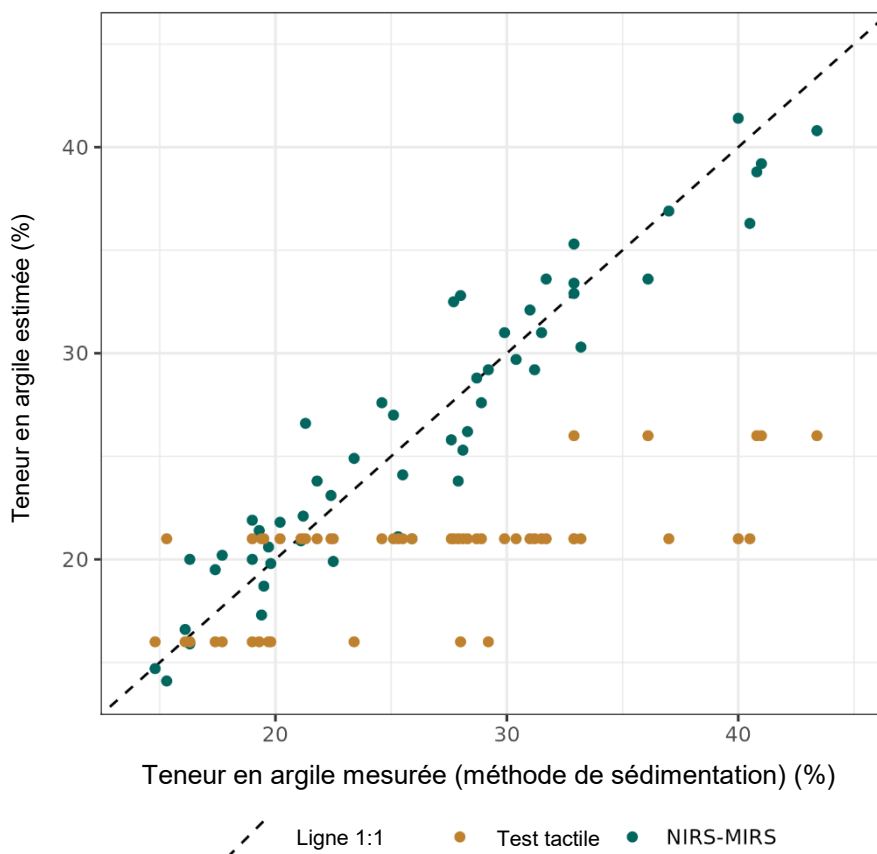


Figure 1: Relation entre la teneur en argile mesurée (méthode de sédimentation) et estimée (test tactile et spectroscopie dans le domaine du proche et moyen infrarouge (NIRS-MIRS) de 53 échantillons de sol provenant de onze parcelles du canton de Zurich et prélevés dans le cadre du projet ESA «SolumScire» (<https://business.esa.int/projects/solumscire-sc>). Comme la teneur en argile est répartie en classes (<10%, 10-19.9%, etc.) aussi bien pour les conseils de fumure que pour l'interprétation des données d'analyse de sol PER, des indications précises relatives aux classes seraient suffisantes pour ces domaines d'application. Dans cette étude, les teneurs en argile estimées par test tactile présentent toutefois jusqu'à deux classes de différence par rapport à la teneur en argile mesurée.

### 3.3 Interprétation selon les PRIF

Le phosphore dans l'extrait H<sub>2</sub>O10 et ainsi que le phosphore et le magnésium dans l'extrait AAE10 ne peuvent actuellement être interprétés que pour des plages de pH de sol définies (tableau 1). Pour le phosphore, cela concerne environ 20% des résultats H<sub>2</sub>O10 et environ 40% des résultats AAE10 (figure 2). D'une part, le risque est grand de fournir des interprétations erronées et des recommandations de fumure incorrectes, d'autre part, les potentiels des méthodes de détermination ne sont pas totalement exploités et les ressources du laboratoire sont utilisées de manière inefficace.

L'interprétation des teneurs en éléments nutritifs du sol pour les besoins de fumure dépend de différentes caractéristiques pédologiques et climatiques d'un site. Actuellement, les tableaux d'interprétation PRIF incluent surtout la teneur en argile comme variable explicative supplémentaire de l'état de fertilité du sol. Bien que le carbone organique du sol ait déjà une grande influence sur la disponibilité des éléments nutritifs dans les sols et sur l'assimilation de ces derniers par les plantes à des teneurs de 1,5-2,5% (Johnston et al., 2014), il n'est pris en compte pour l'établissement des recommandations de fumure dans les PRIF qu'à partir d'une teneur > 5,8%. Pour les terres arables dont la teneur en carbone organique du sol est généralement bien inférieure à cette valeur, la recommandation de fertilisation n'est donc pas adaptée. De même, le pH du sol et les caractéristiques climatiques du site influencent les réactions du rendement aux éléments nutritifs disponibles dans le sol et donc les besoins de fumure (figures 3a et 3b; Hirte et al., 2021). Ces éléments ne sont pas non plus pris en compte dans l'interprétation pour le moment.

La classification des teneurs en phosphore dans les tableaux d'interprétation semble trop grossière pour la méthode CO<sub>2</sub>, en particulier au bas de l'échelle, alors qu'elle est trop fine pour la méthode AAE10 afin d'estimer avec suffisamment de précision l'état de fertilité du sol en ce qui concerne la réaction du rendement (Hirte et al., 2021). De plus, le nombre de chiffres après la virgule des teneurs en éléments nutritifs, surtout dans les tableaux pour la méthode CO<sub>2</sub>, suggère une précision de mesure plus élevée que celle qui est réellement possible. En outre, l'indication des résultats de test avec les méthodes CO<sub>2</sub> et CC peut être ambiguë, car elle ne fait pas référence à la concentration des éléments nutritifs dans le sol et n'est donc pas comparable aux résultats des méthodes H<sub>2</sub>O10 et AAE10.

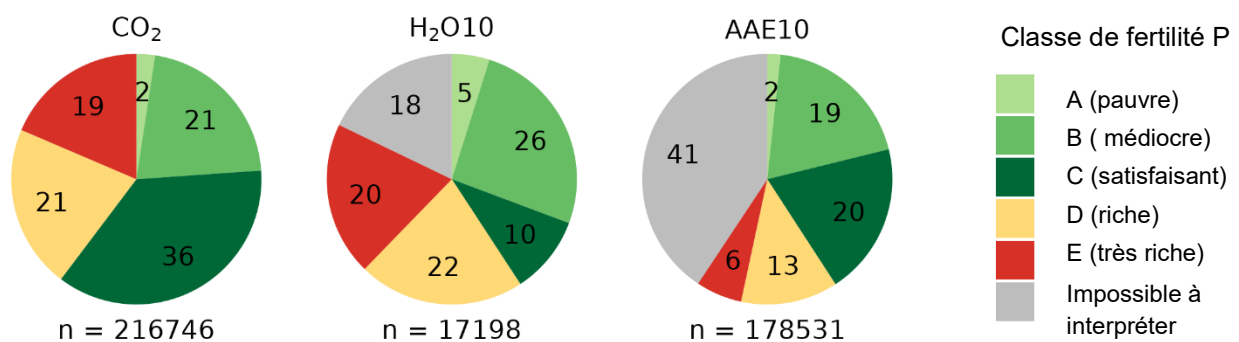


Figure 2: Répartition en pourcentage des résultats des déterminations du phosphore avec les méthodes d'extraction CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O10 et AAE10 dans les PER entre 2010 et 2019 sur les classes de fertilité A (pauvre), B (médiocre), C (satisfaisant), D (riche) et E (très riche) compte tenu du pH, de la granulométrie et de la teneur en carbone organique selon les tableaux 10, 13 et 16 dans Fleisch et al., 2017. Les parts en grisé représentent les résultats qui ne peuvent pas être interprétés actuellement selon les PRIF. n = nombre de mesures.

Dans les PRIF, il manque non seulement des tableaux d'interprétation pour les teneurs en éléments nutritifs dans le sous-sol, mais aussi des informations permettant d'évaluer les teneurs en calcium dans l'extrait AAE10. Selon Fleisch et al., 2017, l'approvisionnement en calcium des plantes serait généralement assuré car le calcium est suffisamment disponible dans les sols suisses. Toutefois, sur les sites où le pH du sol est bas, des troubles liés à une carence en calcium, comme le mildiou ou des tubercules avec le cœur creux, peuvent apparaître dans des cultures qui ont des besoins élevés en calcium, comme les pommes de terre ou les betteraves sucrières (Marschner, 2011). En revanche, un excédent en calcium peut perturber l'absorption du magnésium ou du potassium par les racines des plantes

(antagonisme cationique) et entraîner ainsi une carence de ces éléments nutritifs. La capacité d'échange cationique livre des données sur les rapports cationiques dans le sol et fournit ainsi d'autres informations précieuses pour les recommandations de fumure. Cette analyse doit toutefois être réalisée et payée en plus.

## 4 Propositions de solutions

### 4.1 Prélèvement d'échantillon

L'uniformisation des données dans les sources d'information les plus importantes peut éliminer de nombreuses ambiguïtés. Les méthodes de référence servent de base, mais elles ont besoin d'être actualisées dans le domaine du prélèvement d'échantillons. En particulier, le diamètre de l'échantillonneur, le nombre et la répartition des prélèvements par unité d'échantillonnage et le fractionnement de l'échantillon composé avant l'envoi au laboratoire doivent être clarifiés de manière cohérente. Si le fractionnement de l'échantillon composé s'avère nécessaire pour des raisons de capacité, il doit être expliqué plus en détails. Si le fractionnement doit être évité, le diamètre maximal de l'échantillonneur doit être défini afin de ne pas dépasser une quantité d'échantillons d'environ 1 kg pour 20 prélèvements par unité d'échantillonnage. La pelle Wintex (bodenproben.ch) avec un diamètre d'environ 1,8 cm remplit tout juste cette condition. L'alternative consisterait à réduire le nombre de prélèvements recommandés, ce qui nuirait toutefois à la représentativité spatiale des échantillons composés. De même, les exigences relatives à l'homogénéité d'une unité d'échantillonnage, à sa taille minimale et maximale, ainsi qu'aux informations complémentaires obligatoires telles que la date de prélèvement, la culture, la profondeur de prélèvement, l'exploitation et la surface, et éventuellement les coordonnées, doivent être clairement définies dans les méthodes de référence. Le manuel «Prélèvement et préparation d'échantillons de sols pour l'analyse de substances polluantes» fournit de nombreuses informations sur les principes de base de l'échantillonnage des sols, comme les modèles d'échantillonnage, la réalisation d'échantillons composés ou la profondeur d'échantillonnage (Hämann and Desales, 2003). Ces recommandations reposent sur de nombreuses analyses de sol cantonales et des projets de recherche menés dans les années 1980 et 1990 et pourraient être reprises et éventuellement adaptées pour les analyses d'éléments nutritifs. Si les exigences diffèrent entre le conseil de fumure et les PER, cela doit être réglé de manière cohérente dans l'OPD et les directives qui en découlent.

Bien que les profondeurs d'échantillonnage soient déjà clairement définies dans les méthodes de référence, il reste encore à trouver une approche applicable pour l'ensemble de la Suisse, en particulier pour le traitement des 2 cm supérieurs de la couche arable. La validité des tableaux d'interprétation dans les PRIF (à partir de 0 cm, sauf pour la vigne et les cultures pluriannuelles de petits fruits) est un point de repère important, mais il faut aussi clarifier la manière de traiter les restes d'engrais organiques, les résidus de récolte et le feutrage. Cette question devrait être abordée avec différents groupes d'intérêt représentant les domaines de la recherche, de la pratique et de l'exécution. Un protocole d'échantillonnage uniforme, y compris des instructions brèves (visualisées) rendrait les méthodes de référence plus intuitives et pourrait être utile pour standardiser le prélèvement d'échantillons.

### 4.2 Détermination analytique

Pour l'uniformisation des méthodes d'extraction légères CO<sub>2</sub>, CC et H<sub>2</sub>O<sub>10</sub>, il faut vérifier si une méthode unique pourrait être utilisée à moyen terme pour tous les groupes de cultures. Pour cela, il est possible d'effectuer des études bibliographiques et des analyses de corrélation des données issues d'essais de terrain à long terme en tenant compte des variables annexes (granulométrie, pH, teneur en carbone organique et en calcium du sol) pour les différents éléments nutritifs. Des enquêtes auprès des laboratoires environnementaux peuvent fournir des informations sur les avantages et les inconvénients des méthodes dans la pratique, comme la reproductibilité des résultats, les risques d'erreur, les limites analytiques et les coûts.

En plus de la détermination du phosphore dans les extraits par photométrie, actuellement en vigueur, la spectroscopie d'émission s'est établie ces dernières années pour différentes applications (Ivanov et al., 2012; Adesanwo et al., 2013). L'extension des méthodes de référence dans ce domaine présenterait des avantages pour les analyses de routine dans le cadre du conseil de fumure et du monitoring de l'environnement, car plusieurs

éléments peuvent être mesurés simultanément dans l'extrait et que le phosphore organiquement lié est également détecté. Pour pouvoir comparer les résultats des deux méthodes d'analyse et les utiliser pour interpréter l'état de fertilité du sol, il est nécessaire de disposer de fonctions de conversion numériques qui prennent en compte d'autres propriétés du sol telles que le pH, la teneur en carbone organique et la granulométrie (Adesanwo et al., 2013). Celles-ci peuvent être déduites des données d'essais de terrain longue durée pour les différentes méthodes d'extraction, à l'aide d'analyses de régression multivariées.

La détermination analytique obligatoire de la granulométrie et de la teneur en carbone organique, c'est-à-dire le remplacement du test tactile / visuel comme méthode équivalente, réduirait considérablement les erreurs d'appréciation lors des recommandations de fumure et du monitoring environnemental. Toutefois, pour des raisons de ressources et de capacités, les alternatives actuellement autorisées (méthode de sédimentation pour la granulométrie et méthode du dichromate ou méthode du gradient de température pour la teneur en carbone organique) ne sont pas adaptées aux analyses de routine pour les PER. Le développement et la validation de nouvelles méthodes sont donc une priorité absolue. Dans le domaine de la spectroscopie du sol, les mesures dans le domaine du proche et moyen infrarouge (NIRS-MIRS) sont de plus en plus utilisées pour estimer simultanément et avec une grande précision plusieurs propriétés du sol, entre autres le pH, la teneur en argile, la teneur en carbone total et organique, différentes fractions de carbone, ainsi que le calcium et le magnésium disponibles, sur des échantillons de sol secs et traités (Viscarra Rossel et al., 2006; Zimmermann et al., 2007; Nocita et al., 2015; Baumann et al., 2021; Ramírez et al., 2021). Une bibliothèque de données spectrales pour NIRS-MIRS est actuellement en cours de constitution au Centre de compétences sur les sols, avec pour objectif prioritaire de pouvoir déterminer plus efficacement les propriétés de base des sols, à savoir le pH, la granulométrie, la teneur en carbone organique et la capacité d'échange cationique dans les cartographies cantonales des sols. Plus il y aura de sols différents de toute la Suisse représentés dans la bibliothèque spectrale, plus les propriétés des sols des nouveaux échantillons prélevés pourront être déterminées avec précision et à moindre coût par la technologie NIRS-MIRS. La bibliothèque spectrale peut être élargie à d'autres propriétés du sol, comme la teneur totale en phosphore ou en potassium, si ces paramètres sont également analysés sur un grand nombre d'échantillons de sol.

Les paramètres du sol qui ne changent pas ou peu sur une longue période devraient être géoréférencés et enregistrés dans un système de base de données d'exploitation, de sorte qu'ils puissent être consultés pour différentes tâches de gestion d'exploitation, de conseil et d'exécution et qu'ils ne doivent pas être déterminés à nouveau. Un tel système de base de données pourrait en outre être associé à des informations sur le risque d'érosion, le risque de ruissellement du phosphore, la biodiversité, etc.

### 4.3 Interprétation selon les PRIF

D'un point de vue agronomique, il serait utile de réviser complètement les tableaux d'interprétation des teneurs en éléments nutritifs des sols. D'une part, les tableaux concernant le phosphore dans l'extrait H<sub>2</sub>O<sub>10</sub> ainsi que le phosphore et le magnésium dans l'extrait AAE<sub>10</sub> devraient être étendus à toutes les plages de pH afin d'exploiter pleinement le potentiel des méthodes. En raison de la sensibilité de la méthode AAE<sub>10</sub> aux carbonates dans l'échantillon de sol, il n'a pas été possible jusqu'à présent d'évaluer la réaction du rendement à la teneur en phosphore et donc d'en déduire des recommandations de fumure pour les sols alcalins. Cependant, de nouvelles études réalisées dans le cadre de six essais longue durée sur le terrain avec une fumure phosphatée différenciée sur 30 ans montrent que seule la position de la courbe de réaction du rendement, mais pas sa forme, est véritablement influencée par le pH (figure 3b), de sorte qu'il devrait être possible de déduire les teneurs en phosphore nécessaires pour des rendements optimaux avec une correction correspondante (Hirte et al., 2021).

D'autre part, d'autres propriétés importantes du sol devraient être prises en compte pour l'évaluation de l'état de fertilité du sol et l'assimilation des éléments nutritifs par les plantes. En raison de l'importance particulière du carbone organique du sol pour la structure et donc pour l'aptitude des plantes à s'enraciner, les sols riches en carbone sont souvent encore en mesure de couvrir de manière adéquate les besoins en éléments nutritifs des plantes, même avec de faibles teneurs en éléments nutritifs (Johnston et al., 2014). C'est pourquoi la teneur en carbone organique est aussi importante que la teneur en argile d'un sol pour établir les recommandations de fumure.



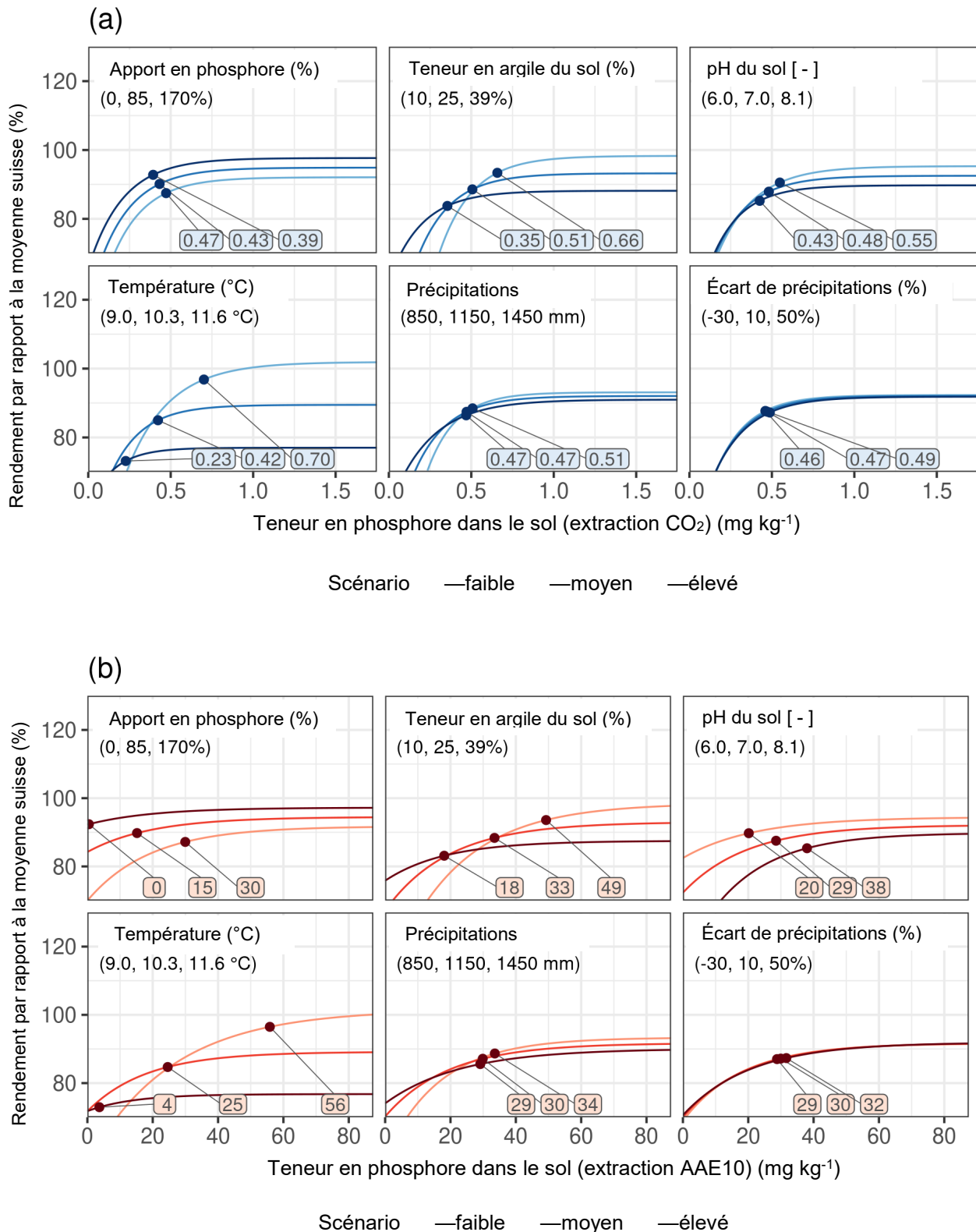


Figure 3: Réactions du rendement des pommes de terre aux teneurs en phosphore du sol mesurées à l'aide des méthodes (a) CO<sub>2</sub> et (b) AAE10 dans six essais suisses longue durée sur le terrain avec une fumure phosphatée différenciée sur 30 ans. La fumure phosphatée est identique sur tous les sites et varie entre 0 et 170% du prélèvement théorique des plantes selon les PRIF. Les sites se caractérisent par des différences dans la teneur en argile et le pH du sol, la température moyenne annuelle, la somme annuelle des précipitations et l'écart des précipitations par rapport à la norme pendant la période de croissance principale. Les teneurs critiques en phosphore dans le sol (chiffres dans les cases) ont été calculées pour des rendements suffisants, c'est-à-dire 95% du rendement maximal, dans différents scénarios (chiffres entre parenthèses). (Hirte et al., 2021)

En outre, la prise en compte des conditions climatiques du site peut contribuer de manière significative à améliorer l'interprétation des teneurs en éléments nutritifs du sol. Par exemple, des températures moyennes annuelles basses se traduisent par des teneurs en phosphore plus élevées pour un rendement optimal (Hirte et al., 2021). Ainsi, il devrait être possible d'établir des recommandations de fumure pour différentes régions climatiques, de la même manière que de sélectionner des variétés de manière ciblée sur la base de sommes de températures (Buzzi et al., 2021).

Les réactions de rendement et les recommandations de fumure devraient être validées séparément pour toutes les méthodes d'extraction. Cela permettrait d'adapter individuellement la précision de la gradation entre les classes de teneur et d'ajuster la précision numérique des paramètres à la précision de l'analyse. En raison de l'importance particulière des réserves du sous-sol en éléments nutritifs pour la nutrition des plantes, il serait également souhaitable à moyen terme de prendre en compte les analyses du sous-sol pour tous les groupes de cultures dans les PRIF. De même, des informations permettant de classer les teneurs en calcium dans l'extrait AAE10 devraient être mises à disposition.

Pour une révision complète des tableaux d'interprétation, il est nécessaire de disposer d'une grande base de données couvrant la variabilité pédoclimatique de la surface affectée à l'agriculture en Suisse. Les données d'analyse des sols PER pourraient être utilisées à cet effet si les paramètres de sol, déterminés par analyse, et les données sur la culture et le rendement, la culture suivante et le rendement escompté, le mode d'exploitation (fumure, travail du sol, variété) et la situation de la surface (pour les informations climatiques) étaient disponibles. Un système professionnel standardisé de gestion des données et une solution de base de données avec des liens automatisés vers des métadonnées (par exemple, variables climatiques, propriétés intrinsèques du sol) offriraient en outre la possibilité d'utiliser les données pour d'autres instruments de conseil, de monitoring et d'exécution dans le cadre de la législation sur la protection des données.

À long terme, les tableaux d'interprétation catégoriques devraient être remplacés par des modèles numériques afin de pouvoir prendre en compte simultanément plusieurs facteurs d'influence importants sur la disponibilité des éléments nutritifs et leurs interactions et d'éviter l'effet de «saut de classe» lors de l'estimation des besoins de fumure (grandes différences dans les besoins de fumure estimés en raison de facteurs de correction classés, par exemple lors d'un changement entre les classes de teneur en argile). Pour cela, il est nécessaire d'utiliser un outil numérique de recommandation de fumure comme le BESyD utilisé en Allemagne (LfULG Sachsen, 2021) ou l'interrogateur australien BFDC (NSW DPI, 2021). De tels systèmes peuvent être développés de manière modulaire pour des recommandations de gestion dans d'autres domaines, par exemple la fertilisation azotée, les mesures favorisant l'humus, le chaulage, le travail du sol ou le choix des variétés.

## 5 Conclusion

La caractérisation de l'état de fertilité des sols peut encore être largement améliorée, notamment en ce qui concerne le prélèvement d'échantillons, les méthodes de détermination et l'interprétation (figure 4). Il existe ici des possibilités d'amélioration concrètes qui peuvent être mises en œuvre rapidement, mais aussi des approches à moyen et long termes qui doivent encore être optimisées avant de pouvoir être appliquées à grande échelle dans la pratique et l'exécution, comme la méthode NIRS-MIRS. Tant les plans d'exploitation que les mesures d'exécution de la politique agricole (PER), le monitoring agro-environnemental, la caractérisation des sites et la cartographie des sols en bénéficieraient considérablement.

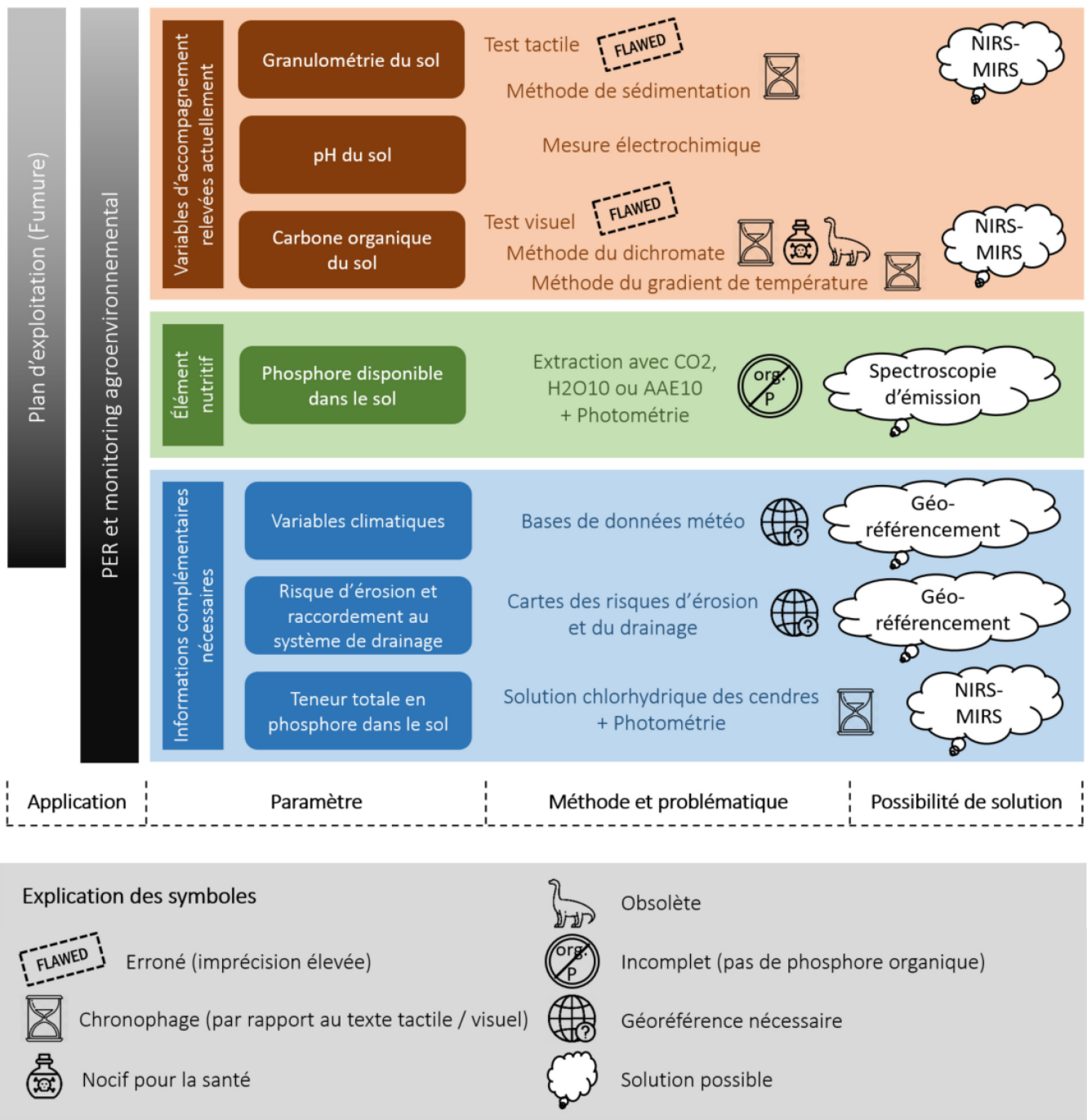


Figure 4: Concept pour le développement de la détermination du phosphore dans le sol pour la planification de la gestion, les PER et le monitoring agro-environnemental.

## 6 Bibliographie

- Adesanwo, O.O., Ige, D.V., Thibault, L., Flaten, D., Akinremi, W., 2013. Comparison of Colorimetric and ICP Methods of Phosphorus Determination in Soil Extracts. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 44, 3061-3075.
- Banerjee, S., Walder, F., Büchi, L., Meyer, M., Held, A.Y., Gattinger, A., Keller, T., Charles, R., Van Der Heijden, M.G., 2019. Agricultural intensification reduces microbial network complexity and the abundance of keystone taxa in roots. *The ISME journal* 13, 1722-1736.
- Baumann, P., Helfenstein, A., Gubler, A., Keller, A., Meuli, R., Wächter, D., Lee, J., Viscarra Rossel, R., Six, J., 2021. Developing the Swiss soil spectral library for local estimation and monitoring. *SOIL Discussions*.
- Bircher, P., Liniger, H., Prasuhn, V., 2019. Aktualisierung und Optimierung der Erosionsrisikokarte (ERK2): Die neue ERK2 (2019) für das Ackerland der Schweiz: Schlussbericht.
- OFAG, 2020. Ordonnance sur les paiements directs versés dans l'agriculture (Ordonnance sur les paiements directs, OPD) du 23 octobre 2013. 910.13. Dans: OFAG, B.f.L. (Ed.), Berne.
- Buzzi, F., Hiltbrunner, J., Holzkämper, A., Calanca, P., 2021. Temperatursummen-Karten für die Sortenwahl im Maisanbau. *Agrarforschung Schweiz* 12, 1-8.
- 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.
- Flisch, R., Neuweiler, R., Kuster, T., Oberholzer, H., Huguenin-Elie, O., Richner, W., 2017. 2/ Bodeneigenschaften und Bodenanalysen. *Grundlagen der Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017)*(Hrsg. W. Richner & S. Sinaj). *Agrarforschung Schweiz* 8, 1-2.
- Hämmann, M., Desaules, A., 2003. *Handbuch: Probenahme und Probenvorbereitung für Schadstoffuntersuchungen in Böden*. Federal Office for the Environment (BUWAL).
- Hirte, J., Richner, W., Orth, B., Liebisch, F., Flisch, R., 2021. Yield response to soil test phosphorus in Switzerland: Pedoclimatic drivers of critical concentrations for optimal crop yields using multilevel modelling. *Science of The Total Environment* 755, 143453.
- Ivanov, K., Zapryanova, P., Petkova, M., Stefanova, V., Kmetov, V., Georgieva, D., Angelova, V., 2012. Comparison of inductively coupled plasma mass spectrometry and colorimetric determination of total and extractable phosphorus in soils. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 71-72, 117-122.
- Johnston, A.E., Poulton, P.R., Fixen, P.E., Curtin, D., 2014. Chapter Five - Phosphorus: Its Efficient Use in Agriculture. In: Sparks, D.L. (Ed.), *Advances in Agronomy*. Academic Press, pp. 177-228.
- Kautz, T., Amelung, W., Ewert, F., Gaiser, T., Horn, R., Jahn, R., Javaux, M., Kemna, A., Kuzyakov, Y., Munch, J.-C., Pätzold, S., Peth, S., Scherer, H.W., Schloter, M., Schneider, H., Vanderborght, J., Vetterlein, D., Walter, A., Wiesenberg, G.L.B., Köpke, U., 2013. Nutrient acquisition from arable subsoils in temperate climates: A review. *Soil Biology and Biochemistry* 57, 1003-1022.
- KIP, 2021. KIP-Richtlinien für den ökologischen Leistungsnachweis (ÖLN). In: (KIP), K.R.T.u.D. (Ed.). Agridea, Eschikon.
- Koch, U., Prasuhn, V., 2020. Drainagekarte Schweiz. Erstellung einer Karte potentiell drainierter Flächen in der Schweiz mittels «Machine Learning». *Agroscope Science*. Agroscope, Zürich, p. 121.
- LfULG Sachsen, 2021. Bilanzierungs- und Empfehlungssystem Düngung BESyD. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Web page: [www.landwirtschaft.sachsen.de/duengebedarfsermittlung-besyd-20619.html](http://www.landwirtschaft.sachsen.de/duengebedarfsermittlung-besyd-20619.html).
- Marschner, H., 2011. *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Academic press.

- Nocita, M., Stevens, A., van Wesemael, B., Aitkenhead, M., Bachmann, M., Barthès, B., Ben Dor, E., Brown, D.J., Clairotte, M., Csorba, A., Dardenne, P., Demattê, J.A.M., Genot, V., Guerrero, C., Knadel, M., Montanarella, L., Noon, C., Ramirez-Lopez, L., Robertson, J., Sakai, H., Soriano-Disla, J.M., Shepherd, K.D., Stenberg, B., Towett, E.K., Vargas, R., Wetterlind, J., 2015. Chapter Four - Soil Spectroscopy: An Alternative to Wet Chemistry for Soil Monitoring. In: Sparks, D.L. (Ed.), *Advances in Agronomy*. Academic Press, pp. 139-159.
- NSW DPI, 2021. Making Better Fertiliser Decisions for Cropping Systems in Australia (BFDC). New South Wales Department of Primary Industries. Web page: [www.bfdc.com.au](http://www.bfdc.com.au).
- PIOCH, 2021. PER - Romandie 2021 Prestations écologiques requises: règles techniques. Groupe romand de coordination PER grandes cultures, fourragères, maraîchères et PIOCH.
- Ramírez, P.B., Calderón, F.J., Haddix, M., Lugato, E., Cotrufo, M.F., 2021. Using Diffuse Reflectance Spectroscopy as a High Throughput Method for Quantifying Soil C and N and Their Distribution in Particulate and Mineral-Associated Organic Matter Fractions. *Frontiers in Environmental Science* 9.
- Richardson, A.E., George, T.S., Hens, M., Simpson, R.J., 2005. Utilization of soil organic phosphorus by higher plants. *Organic phosphorus in the environment*, 165-184.
- Steinurth, K., Hirte, J., Morel, C., Buczko, U., 2021. Conversion equations between Olsen-P and other methods used to assess plant available soil phosphorus in Europe—A review. *Geoderma* 401, 115339.
- Stünzi, H., 2006. Die P-Bodenextraktionsmethoden mit Wasser und CO<sub>2</sub>-Wasser. *Agrarforschung Schweiz* 13, 284-289.
- Stünzi, H., 2007. Bodenuntersuchungsmethoden für K, Ca und Mg im Vergleich. *Agrarforschung Schweiz* 14, 358-363.
- Viscarra Rossel, R.A., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janik, L.J., Skjemstad, J.O., 2006. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma* 131, 59-75.
- Zimmermann, M., Leifeld, J., Fuhrer, J., 2007. Quantifying soil organic carbon fractions by infrared-spectroscopy. *Soil Biology and Biochemistry* 39, 224-231.